

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problems Mailbox.**

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **09196986 A**(43) Date of publication of application: **31.07.97**

(51) Int. Cl.

**G01R 29/08**  
**G06F 17/50**  
**// G01R 31/28**

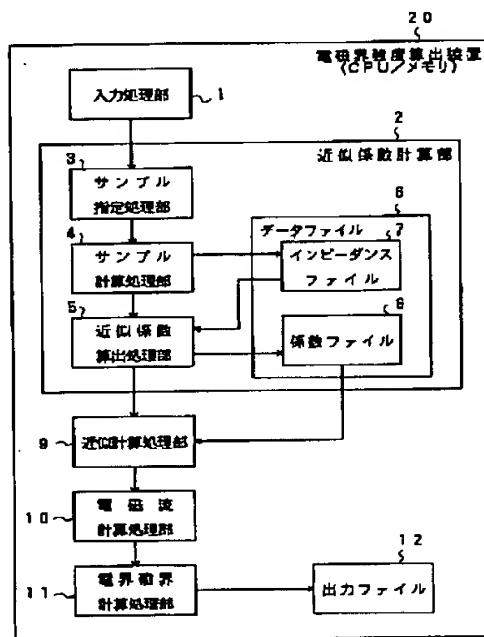
(21) Application number: **08302849**(22) Date of filing: **14.11.96**(30) Priority: **16.11.95 JP 07298062**(71) Applicant: **FUJITSU LTD**(72) Inventor: **OTSU SHINICHI**  
**MUKAI MAKOTO**(54) **DEVICE AND METHOD FOR MEASURING ELECTROMAGNETIC FIELD INTENSITY**

## (57) Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To calculate the electromagnetic field intensity radiated by an electric circuit at a high speed while keeping the accuracy high, in a device for measuring electromagnetic field intensity.

**SOLUTION:** A sample calculation processing part 4 calculates mutual impedance, etc., at sampling frequency without using an approximate equation. The mutual impedance, etc., and sampling frequency are used to calculate an approximate coefficient according to an approximate equation which comprises polynomials of frequency expressed by approximate coefficient and frequency and shows mutual impedance, etc., by means of a processing part 5 for calculating approximate coefficient. The processing part 9 calculates a mutual impedance, etc., at designated frequency according to the approximate expression by using the approximate coefficient. The mutual impedance, etc., are used to calculate a current value and/or magnetic current value flowing in each element by means of an electromagnetic current calculation processing part 10. A processing part 11 for calculating electric field and magnetic field calculates electric field and magnetic field with the current value and/or magnetic current value.

COPYRIGHT: (C)1997,JPO



(51) Int.Cl. <sup>8</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 R 29/08			G 0 1 R 29/08	Z
G 0 6 F 17/50			G 0 6 F 15/60	6 6 6 Z
// G 0 1 R 31/28			G 0 1 R 31/28	F

審査請求 未請求 請求項の数14 O L (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願平8-302849  
 (22) 出願日 平成8年(1996)11月14日  
 (31) 優先権主張番号 特願平7-298062  
 (32) 優先日 平7(1995)11月16日  
 (33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000005223  
 富士通株式会社  
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
 1号  
 (72) 発明者 大津 信一  
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
 1号 富士通株式会社内  
 (72) 発明者 向井 誠  
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
 1号 富士通株式会社内  
 (74) 代理人 弁理士 森田 寛 (外1名)

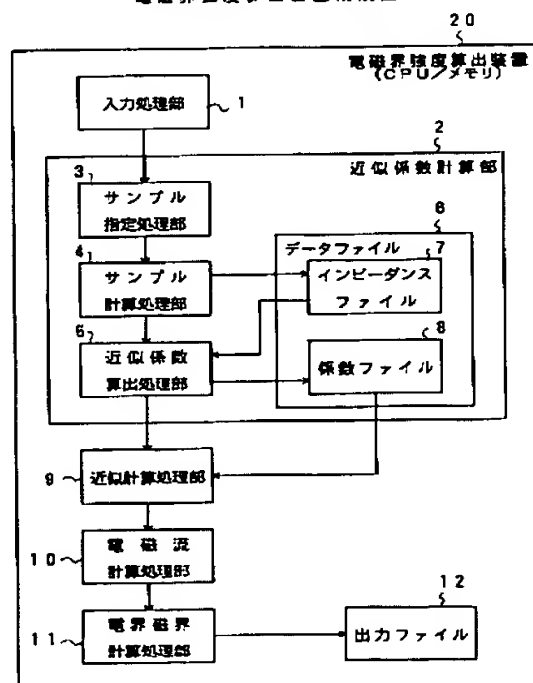
## (54) 【発明の名称】 電磁界強度算出装置及び電磁界強度算出方法

## (57) 【要約】

【課題】 本発明は、電磁界強度算出装置に関し、電気回路装置の放射する電磁界強度を高精度を維持しつつ高速で算出することを目的とする。

【解決手段】 サンプル計算処理部4はサンプリング周波数における相互インピーダンス等を近似式を用いずに算出する。この相互インピーダンス等及びサンプリング周波数を用いて、近似係数算出処理部5は近似係数と周波数とで表された周波数の多項式からなる相互インピーダンス等を表す近似式に従って近似係数を算出する。この近似係数を用いて近似計算処理部9は指定された周波数における相互インピーダンス等を前記近似式により算出する。この相互インピーダンス等を用いて、電磁流計算処理部10は各要素を流れる電流値及び／又は磁流値を算出する。この電流値及び／又は磁流値を用いて電界磁界計算処理部11は電界及び磁界を算出する。

電磁界強度算出装置構成図



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する電磁界強度算出装置において、

相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てについて、当該相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す近似式における複数の近似係数を算出する近似係数計算部と、

前記近似係数計算部が算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を算出する近似計算処理部と、

前記近似計算処理部が算出した近似値を用いた所定の計算によって、各要素を流れる電流、磁流のいずれか又は両方の値を算出する電磁流計算処理部と、

前記電磁流計算処理部が算出した複数の電流、磁流のいずれか又は両方の値を用いた所定の計算によって、電界及び磁界を算出する電界磁界計算処理部とを備えることを特徴とする電磁界強度算出装置。

【請求項 2】 前記近似係数計算部は、複数のサンプリング周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てを、近似式を用いない所定の計算によって算出するサンプル計算処理部と、

前記サンプル計算処理部が算出した複数の相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクション及び複数のサンプリング周波数を用いて、近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって当該周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す近似式に従って、複数の近似係数を算出する近似係数算出処理部とを備え、前記近似計算処理部は、前記近似係数算出処理部が算出した複数の近似係数を用いて近似値を算出することを特徴とする請求項 1 に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項 3】 前記電磁流計算処理部が実行する所定の計算は、前記近似計算処理部が算出した近似値を用いてモーメント法の連立方程式を構成してこれを解く計算処理であることを特徴とする請求項 2 に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項 4】 相互インピーダンス  $Z_{ij}$  についての前記近似式は、周波数を  $f$ 、波数を  $k$  (但し、 $k = 2\pi f/c$ 、 $c$  は光速)、距離を  $r$ 、 $j$  を虚数、近似係数を  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $\dots$  及び  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $\dots$  とする時、 $Z_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$  であることを特徴とする請求項 2 に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項 5】 相互アドミッタンス  $Y_{ij}$  についての前記近似式は、周波数を  $f$ 、波数を  $k$  (但し、 $k = 2\pi f/c$ 、 $c$  は光速)、距離を  $r$ 、 $j$  を虚数、近似係数を  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $\dots$  及び  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $\dots$  とする時、 $Y_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$  であることを特徴とする請求項 2 に記載の電磁界強度算出装置。

$c$ 、 $c$  は光速)、距離を  $r$ 、 $j$  を虚数、近似係数を  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $\dots$  及び  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $\dots$  とする時、 $Y_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$  であることを特徴とする請求項 2 に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項 6】 相互リアクション  $B_{ij}$  についての前記近似式は、周波数を  $f$ 、波数を  $k$  (但し、 $k = 2\pi f/c$ 、 $c$  は光速)、距離を  $r$ 、 $j$  を虚数、近似係数を  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $\dots$  及び  $d_0$ 、 $d_1$ 、 $\dots$  とする時、 $B_{ij} = \exp(-jkr) [c_0 + c_1 f^2 + c_2 f^4 + c_3 f^6 + c_4 f^8 + \dots + j(d_0 f + d_1 f^3 + d_2 f^5 + d_3 f^7 + d_4 f^9 + \dots)]$  であることを特徴とする請求項 2 に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項 7】 サンプリング周波数の個数が前記近似式の実数部における項数及び虚数部における項数と等しいことを特徴とする請求項 4 乃至請求項 6 のいずれかに記載の電磁界強度算出装置。

【請求項 8】 シミュレーションの範囲として入力された周波数範囲とサンプリング周波数の個数とに基づいて、複数のサンプリング周波数の値を指定するサンプル指定処理部を更に備えることを特徴とする請求項 7 に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項 9】 前記サンプル計算処理部が算出した複数の相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを所定のファイルに格納し、前記近似係数算出処理部が、複数の近似係数を算出するために複数の相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを前記ファイルから読み出し、これらを用いて複数の近似係数を算出し、この算出した複数の近似係数を先に複数の相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションが格納されていたファイルに格納することを特徴とする請求項 2 に記載の電磁界強度算出装置。

【請求項 10】 電気回路装置における相互インピーダンスを算出する電磁界強度算出装置であって、複数のサンプリング周波数における相互インピーダンスを近似式を用いない所定の計算によって算出するサンプル計算処理部と、

前記サンプル計算処理部が算出した複数の相互インピーダンスを用いて、近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって当該周波数における相互インピーダンスの近似値を表す近似式に従って、複数の近似係数を算出する近似係数算出処理部と、前記近似係数算出処理部が算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数の各々についての相互インピーダンスの近似値を算出する近似計算処理部とを備えることを特徴とする電磁界強度算出装置。

【請求項 11】 電気回路装置における相互アドミッタ

3

ンスを算出する電磁界強度算出装置であって、  
複数のサンプリング周波数における相互アドミッタンスを近似式を用いない所定の計算によって算出するサンプル計算処理部と、  
前記サンプル計算処理部が算出した複数の相互アドミッタンスを用いて、近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって当該周波数における相互アドミッタンスの近似値を表す近似式に従って、複数の近似係数を算出する近似係数算出処理部と、  
前記近似係数算出処理部が算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数の各々における相互アドミッタンスの近似値を算出する近似計算処理部とを備えることを特徴とする電磁界強度算出装置。

【請求項 1 2】 電気回路装置における相互リアクションを算出する電磁界強度算出装置であって、  
複数のサンプリング周波数における相互リアクションを近似式を用いない所定の計算によって算出するサンプル計算処理部と、  
前記サンプル計算処理部が算出した複数の相互リアクションを用いて、近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって当該周波数における相互リアクションの近似値を表す近似式に従って、複数の近似係数を算出する近似係数算出処理部と、  
前記近似係数算出処理部が算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数の各々における相互リアクションの近似値を算出する近似計算処理部とを備えることを特徴とする電磁界強度算出装置。

【請求項 1 3】 電気回路装置の放射する電磁界強度を電磁界強度算出装置によって算出する電磁界強度算出方法において、  
前記電磁界強度算出装置が、  
相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てを算出するサンプル計算処理部と、  
近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって当該周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す近似式に従って、複数の近似係数を算出する近似係数算出処理部と、  
前記近似式に従って、指定された周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を算出する近似計算処理部と、  
各要素を流れる電流、磁流のいずれか又は両方の値を算出する電磁流計算処理部と、  
電界及び磁界を算出する電界磁界計算処理部とを備え、  
前記サンプル計算処理部が、前記近似式の実数部の項数及び虚数部の項数と等しい数のサンプリング周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互

4

リアクションのいずれか又は全てを、前記近似式を用いない所定の計算によって算出し、  
前記近似係数算出処理部が、複数のサンプリング周波数と前記サンプル計算処理部の算出した複数の相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションとを用いて、前記近似式に従って連立方程式を立てこれを解くことにより、複数の近似係数を算出し、  
前記近似計算処理部が、前記近似係数算出処理部の算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数の各々における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を算出し、  
前記電磁流計算処理部が、前記近似計算処理部の算出した近似値を用いてモーメント法の連立方程式を構成し、各要素を流れる電流、磁流のいずれか又は両方の値を算出し、  
前記電界磁界計算処理部が、前記電磁流計算処理部の算出した複数の電流、磁流のいずれか又は両方の値を用いた所定の計算によって電界及び磁界を算出することを特徴とする電磁界強度算出方法。

【請求項 1 4】 電気回路装置の放射する電磁界強度を電磁界強度算出装置によって算出する電磁界強度算出方法において、  
前記電磁界強度算出装置が、  
相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てを算出するサンプル計算処理部と、  
近似係数と周波数のべき乗との積の多項式で表された近似式であって当該周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを表す近似式に従って、複数の近似係数を算出する近似係数算出処理部と、  
前記近似式に従って、指定された周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を算出する近似計算処理部と、  
各要素を流れる電流、磁流のいずれか又は両方の値を算出する電磁流計算処理部と、  
電界及び磁界を算出する電界磁界計算処理部とを備え、  
当該電磁界強度算出方法が、  
複数のサンプリング周波数について実行される第 1 の処理と、  
前記第 1 の処理の後に、シミュレーションの範囲として入力された周波数範囲内の所定の周波数について繰り返し実行される第 2 の処理とからなり、  
前記第 1 の処理は、  
前記サンプル計算処理部が複数のサンプリング周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てを、前記近似式を用いない所定の計算によって算出する処理と、

前記近似係数算出処理部が、複数のサンプリング周波数と前記サンプル計算処理部の算出した複数の相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションとを用いて、前記近似式に従って連立方程式を立てこれを解くことにより、複数の近似係数を算出する処理とからなり、

前記第2の処理は、

前記近似計算処理部が、前記近似係数算出処理部の算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数の各々における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全ての近似値を算出する処理と、

前記電磁流計算処理部が、前記近似計算処理部の算出した近似値を用いてモーメント法の連立方程式を構成し、各要素を流れる電流、磁流のいずれか又は両方の値を算出する処理と、

電界磁界計算処理部が、前記電磁流計算処理部の算出した複数の電流、磁流のいずれか又は両方の値を用いた所定の計算によって電界及び磁界を算出する処理とからなることを特徴とする電磁界強度算出方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、電磁界強度算出装置及び電磁界強度算出方法に関し、特に、電気回路装置の放射する電磁界の強度を高精度を維持しつつ高速で算出する電磁界強度算出装置及び電磁界強度算出方法に関する。

【0002】電気回路装置から放射される電波は、テレビやラジオ等の他の電波と干渉することから、最近、各国で厳しく規制されるようになってきた。このような規制の規格として、日本ではVCCI規格があり、米国ではFCC規格があり、ドイツではVDE規格がある。

【0003】このような電波規格を満足させるためには、シールド技術やフィルタ技術等のような種々の技術が用いられる。これらの技術の採用に当たって、当該対策技術がどの程度電波を減少させるかを定量的にシミュレートする必要がある。そこで、高精度で電気回路装置の放射する電磁界強度をシミュレートできる電磁界強度算出装置が必要とされている。

【0004】

【従来の技術】任意形状の物体から放射される電磁界強度は、物体各部に流れる電流が判る場合、公知の理論式を用いて容易に計算することができる。この電流値は、理論的には、マクスウェルの電磁方程式を与えられた境界条件の下で解くことで得られる。しかし、任意形状物体を対象とした複雑な境界条件の下での解析的な解法は現在知られていない。

【0005】従って、現在の電磁界強度算出装置で用いられている電流を求める解法は、難易の程度の差はあるにせよ、全て近似的なものである。現在、この近似的な

解法として、微小ループアンテナ近似法と、分布定数線路近似法と、モーメント法という3種類のものが知られている。

【0006】微小ループアンテナ近似法は、波源回路と負荷回路との間を接続する配線をループアンテナとして扱い、ループ上の電流は平坦なものと仮定して、この電流を集中定数回路の計算手法で求める方法である。微小ループアンテナ近似法による計算は最も簡単である。しかし、ループの寸法が電磁波の波長に比べて無視できない条件の下では、計算の精度が極めて低下するため、実際には殆ど用いられない。

【0007】分布定数線路近似法は、1次元の構造物として近似できる物体に対して、分布定数線路の方程式を適用することで電流を求める方法である。分布定数線路近似法による計算は比較的簡単であり、また、計算時間及び記憶容量も解析要素数にほぼ比例して増加するに止まり、更に、線路の反射や共振等の現象も含めた解析ができる。従って、1次元の近似が成立する物体については、高精度かつ高速での解析ができる。しかし、分布定数線路近似法には、1次元の構造物として近似できない物体については解析できないという問題点がある。

【0008】モーメント法は、マクスウェルの電磁方程式から導かれる積分方程式の解法の1つであり、3次元の任意形状物体を扱うことができる。具体的には、モーメント法は物体を小さな要素（ワイヤ又はパッチ等）に分割して（メッシュ化して）電流の計算を行う手法である。モーメント法が3次元の任意形状物体を扱い得るため、電磁界強度算出装置においてはモーメント法を用いて電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する構成が有力である。

【0009】モーメント法についての参考文献としては、以下のものがある。

【参考文献】H. N. Wang, J. H. Richmond and M. C. Gilreath: "Sinusoidal reaction formulation for radiation and scattering from conducting surface" IEEE TRANSACTIONS ANTENNAS PROPAGATION vol. AP-23 1975

図17は従来の電磁界強度算出装置が実行するモーメント法による電磁界強度算出の処理フローの概略を示す。

【0010】シミュレーションの対象である電気回路装置についてメッシュ化した構造情報を入力データ100として用意した後、入力データ100の読み込み及び構造物と配列の設定を行う(S101)。この後、登録されている全周波数についての処理が終了したか否かを調べる(S102)。未処理の周波数がない場合には処理を終了する。

【0011】未処理の周波数がある場合には次に処理する周波数を1個選択して、当該周波数についての処理を開始する。即ち、3次元の任意形状物体を所定の大きさに分割して得た複数の要素（パッチ）間の各々について、その相互インピーダンス $Z_{ij}$ を所定の計算により求

める(S103)。そして、求めた相互インピーダンス $Z_{ij}$ と構造情報において指定されたモーメント法の波源である電圧値 $V_i$ とをモーメント法の連立方程式に代入して、その解である電流値 $I_i$ を求める(S104)。

【0012】次に、登録されている全観測点についての処理が終了したか否かを調べる(S105)。未処理の観測点がある場合、次に処理する観測点を1個選択して、S105において求めた電流値 $I_i$ が当該観測点に与える電磁界強度(電界E及び磁界Hの強さ)を算出し、これを出力データ101として格納し(S106)、この後ステップS105を繰り返す。ステップS105において、未処理の観測点がない場合、ステップS102以下を繰り返す。

#### 【0013】

【発明が解決しようとする課題】EMC電波規制の規格においては、規制周波数帯域内で許容値が規定されている。例えば、日本におけるEMC電波規制の規格であるVCCI規格においては、規制周波数帯域が30MHz～1GHzとされ、この帯域内で許容値が規定されている。

【0014】ところで、図18に示すように、電波規制の対象である電気回路装置の一例として、プリント板102上の伝送線路103が考えられる。伝送線路103はドライバ(出力回路)104の出力をレシーバ(受信回路)105に送る。ドライバ104の出力はパルス状の電圧波形を持つ。従って、実際に伝送線路103から放射される成分には、クロックの基本周波数( $f_0$ )成分以外に、その整数倍の高調波( $f_1, f_2, \dots, f_n, \dots$ )成分が含まれている。

【0015】このため、電磁界強度算出装置においては、伝送線路103が発生する規制周波数帯域内にある高調波成分についてシミュレーションする必要がある。このようなシミュレーションの結果、図19に示すような電界スペクトラム図が得られる。図19の電界スペクトラム図は電磁界強度算出装置がモーメント法により各周波数について算出した電界強度の集合である。

【0016】しかし、従来の電磁界強度算出装置によって図19の電界スペクトラム図を得るためには、モーメント法による電磁界強度の算出を各周波数(基本周波数成分及び/又は高調波成分の各々)について各々実行しなければならない。即ち、図17に示すように、各周波数毎にS103及びS104を繰り返す必要がある。このため、従来の電磁界強度算出装置が行うシミュレーションによってEMC電波規制の規格を満足するか否かを判断するためには、極めて長い時間を必要とするという問題があった。特に、図17の相互インピーダンスの計算

(S103)には、その計算量が膨大であるために、極めて長い時間を必要とするという問題があった。

【0017】即ち、従来の電磁界強度算出装置は、いずれもモーメント法又は分布定数線路近似法における相互

インピーダンスを求める計算として周知の処理を実行することにより、「各周波数毎に」相互インピーダンスを算出する方式を採用する。このため、従来の電磁界強度算出装置は、各周波数毎にかなりの計算量を伴う処理を行わなければならないという問題を生じていた。なお、この問題は、相互インピーダンスに代えて、相互アドミッタンス又は相互リアクションを求める場合においても同様である。

【0018】計算時間の一例を示すと、以下のようである。計算時間はシミュレーションの対象である3次元の物体の形状にもかなり依存する。しかし、概略的な値として、シミュレーションの対象である3次元の物体を1000パッチの要素(サーフェスパッチ)に分割した場合、1個の周波数について図17のステップS103、S104及びS106を1回実行するために数時間を要していた。即ち、図19の電界スペクトラム図における1個のスペクトラムを求めるために数時間を要していた。より具体的には、相互インピーダンスの計算(S103)に数時間、連立方程式の計算(S104)に数分、通常の電界又は磁界の計算(S106)に数分を要していた。

【0019】本発明は、電気回路装置の放射する電磁界強度を高精度を維持しつつ高速で算出する電磁界強度算出装置及びその算出方法を提供することを目的とする。また、本発明は、電気回路装置の相互インピーダンスを高精度かつ高速で算出する電磁界強度算出装置を提供することを目的とする。

【0020】また、本発明は、電気回路装置の相互アドミッタンスを高精度かつ高速で算出する電磁界強度算出装置を提供することを目的とする。また、本発明は、電気回路装置の相互リアクションを高精度かつ高速で算出する電磁界強度算出装置を提供することを目的とする。

#### 【0021】

【課題を解決するための手段】図1は本発明の原理構成であり、本発明の電磁界強度算出装置を示す。電磁界強度算出装置20は、近似式を用いて解析対象となる電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する装置である。

【0022】サンプル計算処理部4は、複数のサンプリング周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全てを、近似式を用いない所定の計算によって算出する。近似係数算出処理部5は、サンプル計算処理部4が算出した複数の相互インピーダンス等及び複数のサンプリング周波数を用いて、所定の近似式に従って複数の近似係数を算出する。この近似式は、近似係数と周波数とで表された周波数の多項式からなる近似式であって、当該周波数についての相互インピーダンス等を表す。近似計算処理部9は、近似係数算出処理部5が算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、指定された周波数における相互インピーダンス等の近似値を算出する。電磁流計

算処理部10は、近似計算処理部9が算出した相互インピーダンス等の近似値を用いた所定の計算によって、各要素を流れる電流、磁流のいずれか又は両方の値を算出する。電磁流計算処理部10が実行する所定の計算処理は、例えばモーメント法の連立方程式を構成し、これを解く処理である。電界磁界計算処理部11は、電磁流計算処理部10が算出した複数の電流及び／又は磁流の値を用いた所定の計算によって、電界及び磁界を算出する。

【0023】本発明の電磁界強度算出装置20は、周波数の多項式と言う極めて簡潔な形で表される近似式によって、各周波数毎に相互インピーダンス等を求めることを特徴とする。これにより、「各周波数毎」に膨大な量の計算を行うことによって算出されている相互インピーダンス等について、その計算量を大幅に削減して処理を極めて高速化することができる。

【0024】このために、本発明は、本発明者によって初めて導出された相互インピーダンス等の近似式を用いてそれらの算出処理を行う。即ち、本発明は、「相互インピーダンス等は周波数の多項式と言う極めて簡潔な形で表すことができる」という本発明者の知見に基づくものである。更に、本発明は、「相互インピーダンス等を周波数の多項式の形で表した場合、相互インピーダンス等を電流的に取り扱うことができるので相互インピーダンス等を極めて正確に近似できる」という本発明者の知見に基づくものである。

【0025】以下、本発明の電磁界強度算出装置20によって相互インピーダンスを求め、これに基づいてモーメント法の連立方程式を解いて、電界及び磁界を求める場合について説明する。なお、相互アドミッタンス及び相互リアクションを求める場合についても同様である。また、モーメント法の連立方程式以外の方法によって電界及び磁界を求める場合についても同様である。

【0026】本発明の電磁界強度算出装置20において、サンプル計算処理部4が複数のサンプリング周波数における相互インピーダンス $Z_{ij}$ を算出する。この算出は近似式を用いない所定の計算、即ち、モーメント法において常用される周知の計算によって算出する。従って、この値は正確な値である。この相互インピーダンス $Z_{ij}$ を用いて、近似係数算出処理部5は本発明の近似式に従って複数の近似係数を算出する。

【0027】相互インピーダンス $Z_{ij}$ についての近似式は、本発明に従って、 $Z_{ij} = \exp(-jkr) \{a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)\}$ である。ここで、 $f$ は周波数、 $a_0, a_1, \dots$ は実数部の近似係数、 $b_0, b_1, \dots$ は虚数部の近似係数である。また、 $j$ は虚数単位、 $k$ は $k = 2\pi f/c$ で定められる値（波数）、 $r$ は2個の要素（例えばダイポール）の中心間の距離である。

【0028】相互インピーダンス $Z_{ij}$ の近似式の実数部の項数及び虚数部の項数が共に $n$ 個であるとする。この場合、サンプリング周波数の個数は、近似式の実数部の項数 $n$ 及び虚数部の項数 $n$ に等しい $n$ 個とされる。従って、サンプル計算処理部4は $n$ 個の相互インピーダンス $Z_{ij}$ を算出する。この相互インピーダンス $Z_{ij}$ は、各々、実数部 $\alpha_{ij}$ と虚数部 $\beta_{ij}$ とからなる。従って、 $n$ 個の実数部 $\alpha_{ij}$ と虚数部 $\beta_{ij}$ とが既知の値として与えられる。

【0029】近似係数算出処理部5は、 $n$ 個の実数部 $\alpha_{ij}$ の値と $n$ 個のサンプリング周波数とを近似式の実数部に代入することにより、実数部についての $n$ 個の連立方程式を立てる。また、近似係数算出処理部5は、 $n$ 個の虚数部 $\beta_{ij}$ の値と $n$ 個のサンプリング周波数とを近似式の虚数部に代入することにより、虚数部についての $n$ 個の連立方程式を立てる。そして、近似係数算出処理部5は、これらの連立方程式を解くことによって、実数部の近似係数 $a_0, a_1, \dots$ 及び虚数部の近似係数 $b_0, b_1, \dots$ を求める。

【0030】近似計算処理部9は、近似式に従って、相互インピーダンス $Z_{ij}$ の近似値を算出する。この時、近似係数の各々は近似係数算出処理部5によって算出されている。また、周波数は予め指定される。従って、単に近似式の計算をすることにより、何ら複雑で大量の計算をすることなく、相互インピーダンス $Z_{ij}$ の近似値を算出することができる。

【0031】この近似式は、前述のように極めて簡潔な形であるので、その演算処理は極めて短時間で行うことができる。従って、本発明の電磁界強度算出装置20によれば、電界及び磁界の算出に要する時間の大部分を占めていた相互インピーダンス $Z_{ij}$ の算出を極めて短時間で行うことができるので、電磁界強度の算出を極めて短時間で行うことができる。これにより、規制周波数帯域内にある高調波成分についてシミュレーションする場合のように多くの周波数についてシミュレーションする場合でも、電磁界強度の算出を極めて短時間で行うことができる。このため、電磁界強度算出装置20が行うシミュレーションによって、EMC電波規制の規格を満足するか否かを短時間で判断することができる。

【0032】

【発明の実施の形態】

（電磁界強度算出装置の構成の説明）図2は電磁界強度算出装置構成図であり、電磁界強度算出装置20の構成を示す。電磁界強度算出装置20は、近似式を用いて相互インピーダンス等を求め、これを用いてモーメント法の連立方程式を解くことによって、解析対象となる電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する装置である。電磁界強度算出装置20は、CPU、メモリ及びメモリ上の電磁界強度算出プログラムからなる。

【0033】入力処理部1は、電磁界強度算出装置20



が起動された場合、図外の入力ファイルに格納されている構造情報を読み込んで、構造体と配列の設定を行う。構造情報は、シミュレーションの対象である電気回路装置にモーメント法を適用するための情報であって、当該電気回路装置を複数の要素（サーフェスパッチ又はワイヤ）にメッシュ化するための情報である。

【0034】入力処理部1には電磁界強度の算出のための各種のデータが電磁界強度算出装置20の外部から入力される。入力処理部1は、周波数範囲及びシミュレーション（解析）を行うべき周波数が入力された場合、これを取り込んで図外のメモリに格納する。

【0035】周波数範囲はシミュレーションの範囲である。例えば、解析対象の電気回路装置がVCCI規格を満足するかを解析する場合、周波数範囲は規制周波数帯域に等しい30MHz～1GHzとされる。なお、周波数範囲は、EMC電波規制の規格とは無関係に、シミュレーションを行いたい範囲について設定し得る。

【0036】シミュレーションを行うべき周波数は当該周波数における電界及び磁界強度を算出すべき周波数である。例えば、解析対象の電気回路装置の基本クロックの整数倍の周波数であって入力された周波数範囲内にある周波数が、シミュレーションを行うべき周波数とされる。

【0037】シミュレーションを行うべき周波数は、通常、入力された周波数範囲内に多数存在する。そこで、入力処理部1には、例えば解析対象の電気回路装置の基本クロックの周波数が入力される。この基本クロックの周波数に基づいて、入力処理部1は、基本クロック周波数の整数倍であって周波数範囲内にある周波数の全てを算出する。これらの周波数の各々がシミュレーションを行うべき周波数であって、その各々における相互インピーダンスが本発明の近似式を用いて求められる。入力処理部1は算出したシミュレーションを行うべき周波数を図外のメモリに格納する。なお、シミュレーションを行うべき周波数を入力処理部1に直接指定入力しても良い。

【0038】サンプル指定処理部3は、サンプル計算処理部4及び近似係数算出処理部5と共に、近似係数計算部2を構成する。近似係数計算部2はデータファイル6を備える。データファイル6は相互インピーダンスを格納するためのインピーダンスファイル7及び近似係数を格納するための係数ファイル8からなる。

【0039】サンプル指定処理部3は、周波数範囲に基づいて、サンプリング周波数を指定する。このために、サンプル指定処理部3はメモリに格納された周波数範囲を参照する。サンプリング周波数は近似係数を算出するための演算用サンプルである。サンプリング周波数は複数個（ $n$ 個）指定される。この値 $n$ は近似計算処理部9が用いる近似式に応じて定められる。即ち、近似式の実数部及び虚数部の項数 $n$ に等しい値とされる。サンプル

指定処理部3は、指定したサンプリング周波数を図外のメモリに格納する。

【0040】サンプリング周波数は周波数範囲の最大値を $(n-1)$ で割った間隔で概略的に略均等に指定される。例えば、周波数範囲が30MHz～1GHzであり、 $n=5$ である場合、5個のサンプリング周波数 $f_{s1}$ 、 $f_{s2}$ 、 $f_{s3}$ 、 $f_{s4}$ 、 $f_{s5}$ が具体的な数値として指定される。サンプリング周波数 $f_{s1}$ 、 $f_{s2}$ 、 $f_{s3}$ 、 $f_{s4}$ 及び $f_{s5}$ は、各々、30MHz、250MHz、500MHz、750MHz及び1GHzとされる。最も小さいサンプリング周波数 $f_{s1}$ は、完全に均等にした場合の値である0MHzではなく、規制周波数帯域の最小値30MHzとされる。

【0041】但し、サンプリング周波数の間隔の均等性は厳密に要求されるものではない。要するに、近似係数を求めるための連立方程式を立てることができれば良いのであり、その間隔に多少の不均等が生じて、処理上の問題は何ら生じない。

【0042】サンプル計算処理部4は、 $n$ 個のサンプリング周波数における相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションを算出する。このために、サンプル計算処理部4はメモリに格納された $n$ 個のサンプリング周波数を参照する。相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれを算出するかは、シミュレーションの対象である電気回路装置についてメッシュ化した結果によって定められる。従って、相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションのいずれか又は全部が計算される。相互インピーダンス等の算出は、近似式を用いない所定の計算、即ち、モーメント法において常用される周知の計算によって行われる。従って、算出される相互インピーダンス等の値は正確な値である。

【0043】相互インピーダンス $Z_{ij}$ を算出する場合、算出される相互インピーダンス $Z_{ij}$ の数は、 $i$ 及び $j$ の値によって定められる2個の要素間の各々について、サンプリング周波数の個数に等しい $n$ 個である。サンプル計算処理部4は算出した相互インピーダンスをインピーダンスファイル7に格納する。なお、相互アドミッタンス及び相互リアクションを算出する場合、このファイルは、各々、アドミッタンスファイル及びリアクションファイルとされる。

【0044】例えば、 $n=5$ であり、5個のサンプリング周波数 $f_{s1}$ 、 $f_{s2}$ 、 $f_{s3}$ 、 $f_{s4}$ 、 $f_{s5}$ が指定されている場合、各サンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ における相互インピーダンス $Z_{ij,s1} \sim Z_{ij,s5}$ が求められる。従って、 $i$ 及び $j$ の値によって定められる2個の要素間の各々について、5個の相互インピーダンス $Z_{ij,s1} \sim Z_{ij,s5}$ の具体的な数値が求まる。これらの相互インピーダンス $Z_{ij,s1} \sim Z_{ij,s5}$ は以下のように表される。

$$Z_{ij,s1} = \alpha_{ij,s1} + j \beta_{ij,s1}$$

$$\begin{aligned} Z_{ijs2} &= \alpha_{ijs2} + j \beta_{ijs2} \\ Z_{ijs3} &= \alpha_{ijs3} + j \beta_{ijs3} \\ Z_{ijs4} &= \alpha_{ijs4} + j \beta_{ijs4} \\ Z_{ijs5} &= \alpha_{ijs5} + j \beta_{ijs5} \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha_{ij}$ は相互インピーダンス $Z_{ij}$ の実数部の値、 $\beta_{ij}$ は相互インピーダンス $Z_{ij}$ の虚数部の値、 $\alpha$ 及び $\beta$ の添字である $i$ 及び $j$ は1～ $m$ の範囲の値を取り、モーメント法のモードの数である。なお、 $\beta$ の前の $j$ は虚数単位であり、 $\beta$ の添字である $j$ とは区別される。従って、5個の実数部 $\alpha_{ij}$ と虚数部 $\beta_{ij}$ とが具体的な数値として得られる。

【0045】近似係数算出処理部5は、サンプル計算処理部4が算出した $n$ 個の相互インピーダンス等及びサンプル指定処理部3が指定した $n$ 個のサンプリング周波数を用いて、本発明の近似式に従って、近似係数を算出する。このために、近似係数算出処理部5は、メモリに格納された $n$ 個の相互インピーダンス等及び $n$ 個のサンプリング周波数を参照する。近似式は、近似係数と周波数とで表された周波数の多項式からなる近似式であって、当該周波数についての相互インピーダンス等を表す。

【0046】相互インピーダンス $Z_{ij}$ についての近似式は、本発明に従って、 $Z_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$ である。ここで、 $f$ は周波数、 $a_0, a_1, \dots$ は実数部の近似係数、 $b_0, b_1, \dots$ は虚数部の近似係数である。また、 $j$ は虚数単位、 $k$ は $k = 2\pi f/c$ で定められる値、 $r$ は2個の要素の中心間の距離である。言うまでもなく、「 $a_0$ 」の項は「 $a_0 \times f^0 = a_0$ 」なる項であり、「 $b_0/f$ 」の項は「 $b_0 \times f^{-1}$ 」なる項である。従って、実数部は周波数の偶数(0, 2, 4, 6, 8, ...)乗に各近似係数を掛けた項の和であり、虚数部は周波数の奇数(-1, 1, 3, 5, 7, ...)乗に各近似係数を掛けた項の和である。

【0047】相互アドミッタンス $Y_{ij}$ についての近似式は、 $Y_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$ である。これは相互インピーダンスと同じ形である。

【0048】相互リアクション $B_{ij}$ についての近似式は、 $B_{ij} = \exp(-jkr) [c_0 + c_1 f^2 + c_2 f^4 + c_3 f^6 + c_4 f^8 + \dots + j(d_0 f + d_1 f^3 + d_2 f^5 + d_3 f^7 + d_4 f^9 + \dots)]$ である。 $c_0, c_1, \dots$ は実数部の近似係数、 $d_0, d_1, \dots$ は虚数部の近似係数である。これは相互インピーダンスと類似の形であり、虚数部の第1項が周波数 $f$ の「-1乗」ではなく周波数 $f$ の「1乗」から開始される点が異なる。

$$\begin{aligned} \alpha'_{ijs1} &= a_0 + a_1 f_{s1}^2 + a_2 f_{s1}^4 + a_3 f_{s1}^6 + a_4 f_{s1}^8 \\ \alpha'_{ijs2} &= a_0 + a_1 f_{s2}^2 + a_2 f_{s2}^4 + a_3 f_{s2}^6 + a_4 f_{s2}^8 \\ \alpha'_{ijs3} &= a_0 + a_1 f_{s3}^2 + a_2 f_{s3}^4 + a_3 f_{s3}^6 + a_4 f_{s3}^8 \\ \alpha'_{ijs4} &= a_0 + a_1 f_{s4}^2 + a_2 f_{s4}^4 + a_3 f_{s4}^6 + a_4 f_{s4}^8 \end{aligned}$$

【0049】なお、相互インピーダンス等を上述の近似式により近似できることは、後に詳細に説明する。近似式は予め近似係数算出処理部5にプログラムの形で与えられる。この時、その実数部及び虚数部における項数 $n$ が定められる。例えば、 $n=5$ である場合、相互インピーダンス $Z_{ij}$ についての近似式は、 $Z_{ij} = \exp(-jkr)$

$$\begin{aligned} &[a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7)] \text{とされる。相互アドミッタンス } Y_{ij} \text{ についての近似式は、} \\ &Y_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7)] \text{とされる。相互リアクション } B_{ij} \text{ についての近似式は、} \\ &B_{ij} = \exp(-jkr) [c_0 + c_1 f^2 + c_2 f^4 + c_3 f^6 + c_4 f^8 + j(d_0 f + d_1 f^3 + d_2 f^5 + d_3 f^7 + d_4 f^9)] \text{とされる。} \end{aligned}$$

【0050】近似式は入力処理部1からの入力により指定又は変更するようにしても良い。一般的に近似の精度は近似式の項数 $n$ に依存すると考えられる。従って、近似式の形即ち近似式の項数 $n$ を変更することにより、近似の精度をあまり問題にしない時には項数 $n$ を減らしてより高速で電界等を求め、処理時間をあまり問題にしない時には項数 $n$ を増やしてより高い精度で電界等を求めることができる。

【0051】近似係数算出処理部5は、近似係数の算出のためにインピーダンスファイル7に格納された $n$ 個の相互インピーダンス等を読み出すが、読み出した後はインピーダンスファイル7は不要となる。そこで、近似係数算出処理部5は、インピーダンスファイル7として使用されていたファイルに、算出した近似係数を格納する。即ち、インピーダンスファイル7を係数ファイル8として使用する。従って、インピーダンスファイル7と係数ファイル8としては、同一のファイルが用いられる。ファイルに格納すべき相互インピーダンス等及び近似係数のデータ量が多いので、1個のファイルをこのように使用することにより、メモリ資源を有効に活用することができる。

【0052】例えば、 $n=5$ であり、5個のサンプリング周波数 $f_{s1} \sim f_{s5}$ における5個の相互インピーダンス $Z_{ijs1} \sim Z_{ijs5}$ が求められている場合、近似係数算出処理部5は、5個の実数部 $\alpha'_{ij}$ の値と5個のサンプリング周波数とを近似式の実数部に代入することにより、実数部についての5個の連立方程式を立てる。これらの連立方程式は、添字である $i$ 及び $j$ の値で定まる2個の要素間の相互インピーダンス $Z_{ij}$ （の実数部 $\alpha'_{ij}$ ）についてのものである。これらの連立方程式は以下のように表される。

$$\alpha'_{ijss} = a_0 + a_1 f_{ss}^2 + a_2 f_{ss}^4 + a_3 f_{ss}^6 + a_4 f_{ss}^8$$

これらの連立方程式において、相互インピーダンスの実数部  $\alpha'_{ijss}$  の値はサンプル計算処理部 4 に \*

$$Z_{ijss} / \exp[-j(2\pi f_{ss}/c)r] = \alpha'_{ijss} + j\beta'_{ijss}$$

$$Z_{ijss} / \exp[-j(2\pi f_{ss}/c)r] = \alpha'_{ijss} + j\beta'_{ijss}$$

$$Z_{ijss} / \exp[-j(2\pi f_{ss}/c)r] = \alpha'_{ijss} + j\beta'_{ijss}$$

$$Z_{ijss} / \exp[-j(2\pi f_{ss}/c)r] = \alpha'_{ijss} + j\beta'_{ijss}$$

$$Z_{ijss} / \exp[-j(2\pi f_{ss}/c)r] = \alpha'_{ijss} + j\beta'_{ijss}$$

また、サンプリング周波数  $f_{ss} \sim f_{ss}$  の値は指定されている。更に、 $i$  及び  $j$  の値で定まる 2 個の要素の中心間の距離  $r$  は既知の値である。従って、5 個の未知数  $a_0 \sim a_4$  についての 5 個の連立方程式を解くことによって、近似係数  $a_0 \sim a_4$  の値を求めることができる。従って、これらの近似係数  $a_0 \sim a_4$  は、 $i$  及び  $j$  の値で定まる 2 個の要素間の相互インピーダンス  $Z_{ij}$  (の実数部) を表す近似式において用いられる近似係数である。 ※

$$\beta'_{ijss} = b_0 + b_1 f_{ss}^2 + b_2 f_{ss}^4 + b_3 f_{ss}^6 + b_4 f_{ss}^8$$

$$\beta'_{ijss} = b_0 + b_1 f_{ss}^2 + b_2 f_{ss}^4 + b_3 f_{ss}^6 + b_4 f_{ss}^8$$

$$\beta'_{ijss} = b_0 + b_1 f_{ss}^2 + b_2 f_{ss}^4 + b_3 f_{ss}^6 + b_4 f_{ss}^8$$

$$\beta'_{ijss} = b_0 + b_1 f_{ss}^2 + b_2 f_{ss}^4 + b_3 f_{ss}^6 + b_4 f_{ss}^8$$

$$\beta'_{ijss} = b_0 + b_1 f_{ss}^2 + b_2 f_{ss}^4 + b_3 f_{ss}^6 + b_4 f_{ss}^8$$

これらの連立方程式を解くことによって、近似係数  $b_0 \sim b_4$  の値を求めることができる。従って、これらの近似係数  $b_0 \sim b_4$  は、 $i$  及び  $j$  の値で定まる 2 個の要素間の相互インピーダンス  $Z_{ij}$  (の虚数部) を表す近似式において用いられる近似係数である。

【0054】以上が近似係数計算部 2 における処理である。近似係数計算部 2 が行う処理は、相互インピーダンス等の近似式における近似係数を算出して近似式を完成する処理である。この処理は各周波数における相互インピーダンス等を近似計算により求める処理の前処理である。この処理は  $n$  個からなる 1 組のサンプリング周波数について 1 回だけ実行される。近似係数計算部 2 においては、相互インピーダンス等の算出処理が近似式を用いない周知の方法によって行われる。しかし、この算出処理は着目した 2 個の要素間あたり高々数個の相互インピーダンス等について行われるのみである。従って、この算出処理が全体の処理時間に与える影響はあまり大きくない。

【0055】これに対して、実際の相互インピーダンス等の算出処理は近似計算処理部 9 において行われる。この算出処理は簡潔な形の近似式を用いた近似計算により行われる。従って、1 個の周波数における相互インピーダンスの算出に要する時間は極めて短時間である。この算出処理は、周波数範囲内にある複数個 (例えば後述の 98 個) の所定の周波数について、繰り返し実行される。しかし、1 個の周波数についての処理時間が極めて短いので、結果として全体の処理時間を極めて短くできる。

【0056】近似計算処理部 9 は、近似係数算出処理部

\* おける計算を基に以下のように計算される。

※【0053】同様に、近似係数算出処理部 5 は、5 個の虚数部  $\beta'_{ij}$  の値と 5 個のサンプリング周波数とを近似式の虚数部に代入することにより、虚数部についての 5 個の連立方程式を立てる。これらの連立方程式は、 $i$  及び  $j$  の値で定まる 2 個の要素間の相互インピーダンス  $Z_{ij}$  (の虚数部  $\beta'_{ij}$ ) についてのものである。これらの連立方程式は以下のように表される。

5 が算出した複数の近似係数を用いて、前記近似式に従って、周波数範囲内の所定の周波数についての相互インピーダンス等の近似値を算出する。このために、近似計算処理部 9 は係数ファイル 8 を参照する。前述の近似式において、周波数  $f$  以外の値は既に定まっている。従って、所望の周波数を近似式に代入することにより、当該周波数における相互インピーダンス等が算出できる。近似計算処理部 9 は、算出した相互インピーダンス等をメモリの所定の位置に格納する。

【0057】例えば、 $n=5$  である場合、相互インピーダンス  $Z_{ij}$  についての近似式は、 $Z_{ij} = \exp[-j(2\pi f/c)r] [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + j(b_0 + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7)]$  とされる。この近似式において、2 個の要素の中心間の距離  $r$ 、近似係数  $a_0 \sim a_4$  及び  $b_0 \sim b_4$  は既知の値である。そこで、周波数  $f$  を近似式に代入することにより、当該周波数における相互インピーダンス  $Z_{ij}$  を算出することができる。

【0058】この近似式を用いて、周波数範囲内の所定の周波数における相互インピーダンスの計算が繰り返行われる。例えば、電気回路装置の基本クロックの周波数が 10 MHz であり周波数範囲が 30 MHz  $\sim$  1 GHz である場合、基本周波数 10 MHz の高調波の各々における相互インピーダンスが求められる。高調波は基本周波数の整数倍であるから、周波数範囲 30 MHz  $\sim$  1 GHz 内に存在する高調波は、30 MHz、40 MHz、50 MHz、 $\dots$ 、990 MHz、1 GHz である。即ち、周波数範囲内に 98 個存在する。この 98 個の高調波における相互インピーダンス  $Z_{ij}$  が、従来とは異なり、近似式により算出される。

【0059】なお、電磁界強度算出装置20によって、電気回路装置における相互インピーダンスのみを算出することもできる。即ち、電磁界強度算出装置20を相互インピーダンス算出装置として用いることもできる。この場合、電磁流計算処理部10及び電界磁界計算処理部11における処理を省略して、近似計算処理部9において算出した相互インピーダンスを出力するようにすれば良い。同様にして、相互アドミッタンスのみ又は相互リアクションのみを算出することもできる。

【0060】電磁流計算処理部10は、近似計算処理部9が算出した相互インピーダンス等の近似値を用いてモーメント法の連立方程式を構成し、各要素を流れる電流、磁流のいずれか又は両方の値を算出する。このために、電磁流計算処理部10は、近似計算処理部9がメモリに格納した相互インピーダンス等の近似値を参照する。電磁流計算処理部10は、算出した電流及び／又は磁流の値をメモリの所定の位置に格納する。

【0061】例えば、相互インピーダンス $Z_{ij}$ についてのモーメント法の連立方程式は $[Z_{ij}][I_i] = [V_i]$ である。「 $[ ]$ 」はマトリクスを表す。この連立方程式に求めた相互インピーダンス $Z_{ij}$ が代入される。波源 $[V_i]$ は既知であるから、各要素を流れる電流の値 $[I_i]$ が求まる。電流値 $[I_i]$ の算出は周波数範囲内の所定の周波数について繰り返し行われる。相互アドミッタンス及び相互リアクションについても同様である。

【0062】なお、相互インピーダンス $Z_{ij}$ についてのモーメント法の連立方程式は $[Z_{ij}][I_i] = [V_i]$ に限られない。相互アドミッタンス及び相互リアクションについても同様である。これについては後述する。

【0063】電界磁界計算処理部11は、電磁流計算処理部10が算出した複数の電流及び／又は磁流の値を用いた所定の計算によって、電界E及び磁界Hを算出する。このために、電界磁界計算処理部11は、電磁流計算処理部10がメモリに格納した電流及び／又は磁流の値を参照する。電界磁界計算処理部11は算出した電界E及び磁界Hを出力ファイル12に格納する。これにより、電気回路装置の放射する電磁界強度が計算される。

【0064】なお、この後、図外の出力処理部が、出力ファイル12に蓄積された電界E及び磁界Hのデータに基づいて、図19に示す放射電磁界強度の周波数分布をグラフ表示する周波数スペクトラムを生成して出力する。出力処理部が、出力ファイル12に蓄積された電界E及び磁界Hのデータに基づいて、他の形式により電磁界強度の周波数分布を出力するようにしても良い。

(電磁界強度算出処理フロー) 図3は電磁界強度算出装置20が実行する電磁界強度算出処理フローを示す。この処理フローは、相互インピーダンスを算出し、これを用いて電磁界強度を算出する例を示す。なお、相互アド

ミッタンス及び相互リアクションを算出する場合でも同様である。

【0065】電磁界強度算出装置20が起動された場合、入力処理部1が構造情報を読み込み配列を決定する。この後、周波数範囲が外部から指定入力された場合、入力処理部1がこの周波数範囲を取り込む(S1)。

【0066】サンプル指定処理部3が、周波数範囲と近似計算処理部9が使用する近似式の実数部及び虚数部の項数 $n$ とに基づいて、複数のサンプリング周波数を指定する(S2)。

【0067】サンプル計算処理部4が指定された全てのサンプリング周波数における相互インピーダンス $Z_{ij}$ の計算が終了したか否かを調べる(S3)。終了していない場合、サンプル計算処理部4が、モーメント法において用いられる周知の計算によって、未処理の1個のサンプリング周波数における相互インピーダンス $Z_{ij}$ を計算する(S4)。この後、ステップS3を繰り返す。

【0068】終了している場合、近似係数算出処理部5が、近似計算処理部9が使用する近似式の実数部及び虚数部にサンプリング周波数及び対応する相互インピーダンス $Z_{ij}$ を代入することによって連立方程式を立て、これを解くことによって近似係数を算出する(S5)。以上で前処理が終了し、各周波数における相互インピーダンス $Z_{ij}$ の近似計算、これを用いた電流及び／又は磁流の値の計算及びこれに基づく電界磁界の計算の繰り返し処理が開始される。

【0069】近似計算処理部9が周波数範囲内の全ての周波数における相互インピーダンス $Z_{ij}$ の計算が終了したか否かを調べる(S6)。終了した場合、電磁界強度算出処理を終了する。なお、この後、電界スペクトラムを出力する。

【0070】終了していない場合、近似計算処理部9が1個の周波数における相互インピーダンス $Z_{ij}$ (の近似値)を近似式に従って計算する(S7)。電磁流計算処理部10が、モーメント法の連立方程式に相互インピーダンス $Z_{ij}$ の近似値を代入し、これを解くことによって電流及び／又は磁流の値を算出する(S8)。

【0071】電界磁界計算処理部11が全ての観測点についての電流及び／又は磁流の算出が終了したか否かを調べる(S9)。終了していない場合、ステップS6以下を繰り返す。

【0072】終了している場合、電界磁界計算処理部11が、電界E及び磁界Hを計算し、これを出力ファイル12に格納する(S10)。この後、再びステップS9を実行する。

(相互インピーダンスが周波数の多項式で近似できることの証明) 相互インピーダンスが近似式により近似できることを証明する。相互インピーダンスの近似式について説明するために、図4に示すモノポールを考える。図

19

4において、太線はモノポールを示し、点線は展開関数の形状を示す。ここで、モノポール①とモノポール③との傾きを $\phi_1$ とし、モノポール①とモノポール④との傾きを $\phi_2$ とする。図4では、 $\phi_1$ と $\phi_2$ が同じ場合、つまり $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ の場合を記載している。

【0073】相互インピーダンスの一般式は次式で表される。ここで、 $\omega$ は各周波数、 $r$ は距離、 $\rho_1 = -(1/j\omega) \times (\partial J_1 / \partial t)$ であり、 $\rho_2 = -(1/j \times$

$$Z = j\omega \int \left[ \frac{\mu}{4\pi} J_1 J_2 \cos \phi \frac{e^{-jkr}}{r} + \frac{1}{4\pi\epsilon} \rho_1 \rho_2 \frac{e^{-jkr}}{r} \right] ds$$

【0075】 $J_1$ 及び $J_2$ はモーメント法における展開関数である。展開関数はモノポール上の電流分布の形状を表す。展開関数はモーメント法の種類によって異なるが、以下の証明はいずれのモーメント法にも適用できる。即ち、展開関数は正弦波状電流（区分正弦波モーメント法の場合）、三角形電流、パルス関数電流のいずれでも良い。従って、本発明の近似式による相互インピーダンスを算出する処理は、モーメント法の種類を問わず適用できる。また、以下の証明はモノポールの形状は面（サーフェスパッチ）又はワイヤーのいずれにも適用できる。従って、本発明の近似式による相互インピーダンスを算出する処理は、モノポールの形状を問わず適用できる。

【0076】以下、相互インピーダンスが周波数 $f$ の $n$ 乗（ $n = -1, 0, 1, 2, \dots$ ）の多項式で表すことができることを証明する。但し、以下の証明において、必要に応じて、より一般的な形である波数 $k$ を用いる場合がある。ここに、 $k = 2\pi f / c$ である。 $c$ は光速である。

【0077】また、以下の証明は、区分正弦波モーメント法についての証明であるが、他のモーメント法、即

20

\* $\omega) \times (\partial J_2 / \partial t)$ である。また、次式において $s$ を用いているのは、モノポールの形状が線状（即ち、ワイヤー）である場合に限らず、モノポールの形状が面状（即ち、サーフェスパッチ）である場合にも、次式を一般式として適用できることを示すためである。

【0074】

【数1】

ち、展開関数として三角形電流、パルス関数電流を用いたモーメント法にも適用できる。なお、図4においては、図示の都合により展開関数を点線により三角形に表してあるが、以下の説明における展開関数は正弦波状電流である。

【0078】区分正弦波モーメント法において、図4のモノポール①～④の展開関数は以下のように表すことができる。ここで、 $d_1$ はモノポール①の長さ、 $d_2$ はモノポール②の長さ、 $d_3$ はモノポール③の長さ、 $d_4$ はモノポール④の長さである。

電流モノポール①  $J_1 = \text{sinc}(z-z_0)/\text{sinc}d_1$

電流モノポール②  $J_1 = \text{sinc}(z_2-z)/\text{sinc}d_2$

電流モノポール③  $J_2 = \text{sinc}(t-t_0)/\text{sinc}d_3$

電流モノポール④  $J_2 = \text{sinc}(t_2-t)/\text{sinc}d_4$

これらの展開関数を用いて、まず、モノポール①とモノポール③の相互インピーダンス $Z_{13}$ 及びモノポール①とモノポール④の相互インピーダンス $Z_{14}$ を求める。相互インピーダンス $Z_{13}$ 及び $Z_{14}$ は以下のように求まる。

【0079】

【数2】

21

22

$$Z_{13} = \frac{j\omega\mu}{4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_3} \frac{t_1 z_1}{\int \int [\text{sink}(z-z_0) \text{sink}(t-t_0) \cos \phi - \text{cosk}(z-z_0) \text{cosk}(t-t_0)] \frac{e^{-jkr}}{r} dzdt}$$

$$Z_{14} = \frac{j\omega\mu}{4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_4} \frac{t_2 z_1}{\int \int [\text{sink}(z-z_0) \text{sink}(-t+t_2) \cos \phi_2 + \text{cosk}(z-z_0) \text{cosk}(-t+t_2)] \frac{e^{-jkr}}{r} dzdt}$$

【0080】ここで、モノポール間の距離  $r = (z^2 + t^2 - 2zt \cos \phi + h^2)^{1/2}$  であるとする、上式の相互インピーダンス  $Z_{13}$  及び  $Z_{14}$  の係数部は以下のように表す。なお、 $\alpha = c\mu/4\pi$  である。

$$\frac{j\omega\mu}{4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_3} = j \frac{c\mu}{4\pi} \frac{k}{\text{sinkd}_1 \text{sinkd}_3} = j\alpha \frac{k}{A_1}$$

$$\frac{j\omega\mu}{4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_4} = j \frac{c\mu}{4\pi} \frac{k}{\text{sinkd}_1 \text{sinkd}_4} = j\alpha \frac{k}{A_2}$$

【0082】また、モノポール間の距離  $r$  は、一方のモノポールの端点と他方のモノポールの端点との間の距離※30

$$r = [r_0^2 + (r^2 - r_0^2)]^{1/2} = (r_0^2 + \Delta)^{1/2} = r_0(1 + \Delta/r_0^2)^{1/2}$$

$$\approx r_0(1 + \Delta/2r_0^2 - \Delta^2/8r_0^4 + \dots)$$

$$= r_0 + \Delta/2r_0 - \Delta^2/8r_0^3 + \dots = r_0 + d$$

ここで、 $r_0 = (z_1^2 + t_1^2 - 2z_1 t_1 \cos \phi + \text{sinkd}_3^2)^{1/2}$  である。

従って、相互インピーダンス  $Z_{13}$  及び  $Z_{14}$  は以下のように表される。ここで、 $A_1 = \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_3$

【0083】

【数4】

23

24

$$Z_{13} = j\alpha \frac{k}{A_1} e^{-jk r_0} \int_{t_0 z_0}^{t_1 z_1} [\text{sinc}(z-z_0) \text{sinc}(t-t_0) \cos \phi$$

$$-\cos k(z-z_0) \cos k(t-t_0)] \frac{e^{-jk d}}{r} dz dt$$

$$Z_{14} = j\alpha \frac{k}{A_1} e^{-jk r_0} \int_{t_1 z_0}^{t_2 z_1} [\text{sinc}(z-z_0) \text{sinc}(-t+t_2) \cos \phi_2$$

$$+\cos k(z-z_0) \cos k(-t+t_2)] \frac{e^{-jk d}}{r} dz dt$$

【0084】ここで、式を簡潔な形にするために、 $z - z_0 = u$ 、 $t - t_0 = v$ 、 $w = -t + t_2$ とおく。また、モノポールが短いものとして、以下のように多項式近似を行\*20

\*う。ここで、 $\lambda$ は波長であり、 $\lambda = 2\pi/k$ である。

【0085】

【数5】

$$\sin ku \approx ku - (ku)^3/6, \quad \cos ku \approx 1 - (ku)^2/2$$

計算例:

$$\begin{aligned} u=0.1 \lambda \rightarrow \sin(0.2\pi) &= 0.587785 \\ &\approx ku = 0.6283 \quad (+6.89\%) \\ &\approx ku - (ku)^3/6 = 0.586958 \quad (-0.14\%) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos(0.2\pi) &= 0.809016 \\ &\approx 1 - (ku)^2/2 = 0.802608 \quad (-0.79\%) \\ u=0.12 \lambda \rightarrow \sin(0.24\pi) &= 0.684547 \\ &\approx ku = 0.75398 \quad (+10.14\%) \\ &\approx ku - (ku)^3/6 = 0.682542 \quad (-0.29\%) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos(0.24\pi) &= 0.728969 \\ &\approx 1 - (ku)^2/2 = 0.715755 \quad (-1.81\%) \end{aligned}$$

【0086】以上により、相互インピーダンス $Z_{13}$ の実数部 $R_1$ は以下のように表される。なお、(数6)に示す式と(数7)に示す式とは併せて連続して展開される式を示す。また、以下の式において、 $e^{-jk r_0}$ を省略し

てある。

【0087】

【数6】

25

26

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \int \int [\sin ku \sin kv \cos \phi_1 \\
 &\quad - \cos ku \cos kv] \frac{\sin kd}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \int \int \left[ \left( ku - \frac{(ku)^3}{6} \right) \left( kv - \frac{(kv)^3}{6} \right) \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left( 1 - \frac{(ku)^2}{2} \right) \left( 1 - \frac{(kv)^2}{2} \right) \right] \left[ kd - \frac{(kd)^3}{6} \right] \frac{1}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \int \int \left[ uvk^2 - \frac{uv^3 + u^3 v}{6} k^4 + \frac{u^3 v^3}{36} k^6 \right] \cos \phi_1 \\
 &\quad - \left[ 1 - \frac{u^2 + v^2}{2} k^2 + \frac{u^2 v^2}{4} k^4 \right] \left[ kd - \frac{(kd)^3}{6} \right] \frac{1}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{1}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \int \int \left[ uvdk^4 - \left( \frac{uv^3 + u^3 v}{6} d + \frac{uvd^3}{6} \right) k^6 \right. \\
 &\quad \left. + \left( \frac{u^3 v^3}{36} d + \frac{(uv^3 + u^3 v)d^3}{36} \right) k^8 - \frac{u^3 v^3 d^3}{216} k^{10} \right] \cos \phi_1 \\
 &\quad - dk^2 + \left( \frac{u^2 + v^2}{2} d + \frac{d^3}{6} \right) k^4 - \left( \frac{u^2 v^2}{4} d + \frac{u^2 + v^2}{12} d^3 \right) k^6 \\
 &\quad \left. + \frac{u^2 v^2}{24} d^3 k^8 \right] \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

【0088】

【数7】

【0089】ここで、式を簡潔な形にするために、 $k^4$ 等の項の係数をP1～P8に書き換えると、上式は以下のよう表される。

$$R_1 = \left[ \alpha / A_1 \right] \left[ (P_1 k^4 - P_2 k^6 + P_3 k^8 - P_4 k^{10}) \cos \phi_1 - P_5 k^2 + P_6 k^4 - P_7 k^6 + P_8 k^8 \right]$$

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \left[ \alpha e^{-jkr_0} / (d_1 d_3 k^2) \right] \left[ (P_1 k^4 - P_2 k^6 + P_3 k^8 - P_4 k^{10}) \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - P_5 k^2 + P_6 k^4 - P_7 k^6 + P_8 k^8 \right] \\
 &= \left[ \alpha e^{-jkr_0} / (d_1 d_3) \right] \left[ (P_1 k^2 - P_2 k^4 + P_3 k^6 - P_4 k^8) \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - P_5 + P_6 k^2 - P_7 k^4 + P_8 k^6 \right]
 \end{aligned}$$

更に、 $A_1$ はサイン関数なので、これを近似すると、 $A_1 = \sin kd \sin kd_3 \approx d_1 d_3 k^2$ となる。この $A_1$ の近似値を代入し、先に表記を省略した $e^{-jkr_0}$ を戻すと、上式は以下のように表される。



以上により、相互インピーダンス $Z_{13}$ の実数部 $R_1$ が求まる。

【0090】次に、相互インピーダンス $Z_{13}$ の虚数部 $I_1$ は以下のように表される。なお、(数8)に示す式と(数9)に示す式とは併せて連続して展開される式を示\*

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint [\sin ku \sin kw \cos \phi_1 \\
 &\quad + \cos ku \cos kw] \frac{\cos kd}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint \left[ \left[ ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[ kw - \frac{(kw)^3}{6} \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left[ 1 - \frac{(ku)^2}{2} \right] \left[ 1 - \frac{(kw)^2}{2} \right] \right] \left[ 1 - \frac{(kd)^2}{2} \right] \frac{1}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint \left[ uwk^2 - \frac{uw^3 + u^3 w}{6} k^4 + \frac{u^3 w^3}{36} k^6 \right] \cos \phi_1 \\
 &\quad - \left[ 1 + \frac{u^2 + w^2}{2} k^2 - \frac{u^2 w^2}{4} k^4 \right] \left[ 1 - \frac{(kd)^2}{2} \right] \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

【0092】

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\alpha}{A_1} \frac{t_1 z_1}{t_0 z_0} \iint \left[ uwk^3 - \left( \frac{uw^3 + u^3 w}{6} + \frac{u w d^2}{2} \right) k^5 \right. \\
 &\quad \left. + \left( \frac{u^3 w^3}{36} + \frac{uw^3 + u^3 w}{12} d^2 \right) k^7 - \frac{u^3 w^3}{72} d^2 k^9 \right] \cos \phi_1 \\
 &\quad - k \left( \frac{u^2 + w^2}{2} + \frac{d^2}{2} \right) k^3 - \left( \frac{u^2 w^2}{4} + \frac{u^2 + w^2}{4} d^2 \right) k^5 \\
 &\quad \left. + \frac{u^2 w^2}{8} d^2 k^7 \right] \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

【0093】ここで、式を簡潔な形にするために、 $k^3$ 等の項の係数を01~08に書き換えると、上式は以下のよう表される。

\*す。また、以下の式において、 $e^{-ikr_0}$ を省略してある。

【0091】

【数8】

50 更に、 $A_1$ の近似値 $A_1 = \sin kd_1 \sin kd_3 \approx d_1 d_3 k^2$ を代入

29

し、また、先に表記を省略した $e^{-jkr_0}$ を戻すと、上述

$$I1 = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3k^2)] [(Q1k^3 - Q2k^5 + Q3k^7 - Q4k^9) \cos \phi 1 \\ - Q5k + Q6k^3 - Q7k^5 + Q8k^7] \\ = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3)] [(Q1k - Q2k^3 + Q3k^5 - Q4k^7) \cos \phi 1 \\ - Q5/k + Q6k - Q7k^3 + Q8k^5]$$

以上により、相互インピーダンス $Z13$ の第1項 $I1$ が求まる。

$$Z13 = R1 + jI1 \\ = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3)] [(P1k^2 - P2k^4 + P3k^6 - P4k^8) \cos \phi 1 \\ - P5 + P6k^2 - P7k^4 + P8k^6] \\ + j[\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3)] [(Q1k - Q2k^3 + Q3k^5 - Q4k^7) \cos \phi 1 \\ - Q5/k + Q6k - Q7k^3 + Q8k^5]$$

相互インピーダンス $Z14$ についても同様にして求めることができる。相互インピーダンス $Z14$ を表す式は、相互インピーダンス $Z13$ を表す式において、 $\cos \phi$ の乗ぜられていない項を逆極性としたものとなる。即ち、相互インピーダンス $Z14$ は以下のように表される。なお、 $P$ 及び $Q$ に相当する係数として $R$ 及び $S$ が用いられる。

$$Z14 = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d4)] [(R1k^2 - R2k^4 + R3k^6 - R4k^8) \cos \phi 2 + R5 - R6k^2 + R7k^4 - R8k^6] + j \\ [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d4)] [(S1k - S2k^3 + S3k^5 - S4k^7) \cos \phi 2 + S5/k - S6k + S7k^3 - S8k^5]$$

ゆえに、相互インピーダンス ( $Z13 + Z14$ ) は、一般的に、以下のように表される。

$$Z13 + Z14 = e^{-jkr_0} [(C0 + C1k^2 + C2k^4 + C3k^6 + C4k^8 + \dots + j(C5k^{-1} + C6k + C7k^3 + C8k^5 + C9k^7 + \dots)]$$

相互インピーダンス ( $Z23 + Z24$ ) についても同様にして求めることができる。 $Z23$ はモノポール②とモノポール③の相互インピーダンスであり、 $Z24$ はモノポール②とモノポール④の相互インピーダンスである。

【0095】従って、相互インピーダンス ( $Z13 + Z14 + Z23 + Z24$ ) も、上式と同様に、波数 $k$  (即ち、周波数 $f$ ) の多項式により表すことができる。

(相互アドミッタンスについて) 相互アドミッタンスに※

単位ベクトル:

$$\begin{aligned} \text{モノポール ① } (s_x, s_y, s_z) &= (0, 0, 1) \\ \text{〃 ③ } (t_x, t_y, t_z) &= (\sin \phi_1, 0, \cos \phi_1) \\ \text{〃 ④ } &= (\sin \phi_2, 0, \cos \phi_2) \\ \rho \text{ 方向 } (v_x, v_y, v_z) &= (x/\rho, h/\rho, 0) \\ \phi \text{ 方向 } (w_x, w_y, w_z) &= (-h/\rho, x/\rho, 0) \end{aligned}$$

【0098】電流源が $z$ 座標にのみ存在する場合、電磁界は円対称 ( $\phi$ 座標に無関係) となり、 $H_\phi$ のみが存在し、以下のように表すことができる。

の場合と同様にして、上式は以下のように表される。

$$I1 = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3k^2)] [(Q1k^3 - Q2k^5 + Q3k^7 - Q4k^9) \cos \phi 1 \\ - Q5k + Q6k^3 - Q7k^5 + Q8k^7] \\ = [\alpha e^{-jkr_0} / (d1d3)] [(Q1k - Q2k^3 + Q3k^5 - Q4k^7) \cos \phi 1 \\ - Q5/k + Q6k - Q7k^3 + Q8k^5]$$

\*【0094】ゆえに、相互インピーダンス $Z13$ は以下のように表される。

※については、上記相互インピーダンスと同様にして周波数の多項式で近似できることが証明でき、かつ、その近似式も前述のように相互インピーダンスの近似式と全く同一であるので、その証明は省略する。

(相互リアクションが周波数の多項式で近似できることの証明) 相互リアクションが近似式により近似できることを証明する。相互リアクションの近似式について説明するために、図5に示すモノポールを考える。図5において、太線はモノポールを示し、点線は展開関数の形状を示す。

【0096】まず、電流源による磁界について考える。区分正弦波モーメント法において、図5のモノポール①～④の展開関数は以下のように表すことができる。ここで、 $d1$ はモノポール①の長さ、 $d2$ はモノポール②の長さ、 $d3$ はモノポール③の長さ、 $d4$ はモノポール④の長さである。

$$\text{電流モノポール ① } J1 = \text{sinc}(z-z0)/\text{sinc}d1$$

$$\text{電流モノポール ② } J2 = \text{sinc}(z2-z)/\text{sinc}d2$$

$$\text{磁流モノポール ③ } M3 = \text{sinc}(t-t0)/\text{sinc}d3$$

$$\text{磁流モノポール ④ } M4 = \text{sinc}(t2-t)/\text{sinc}d4$$

また、単位ベクトルは以下のように表すことができる。

【0097】

【数10】

【0099】

【数11】

31

32

$$H\phi = \frac{1}{\mu} \nabla \times A = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial A_{\rho}}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \right)$$

$$A_{\rho}=0 \text{なので} \quad H\phi = - \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho}$$

【0100】次に、リアクションについて考える。図5において、ワイヤ#2の接戦方向の磁界成分は、 $H_t = -h/\rho \times H\phi \sin\phi$ であるから、リアクションBは以下のように表すことができる。

【0101】

【数12】

$$B = -h \int_t^M \frac{H\phi}{\rho} \sin\phi \, hdt$$

$$= \frac{h}{\mu t} \int \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \sin\phi \, dt$$

\*20

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_z J \frac{e^{-jk r}}{r} dz$$

$$\rho = (x^2 + h^2)^{1/2}$$

$$r = \{ \rho^2 + (z-z')^2 \}^{1/2} = (z^2 + t^2 - 2zt \cos\phi + h^2)^{1/2}$$

$z'$ : モデル③、④のz座標

$$\frac{dr}{d\rho} = \frac{\rho}{r}$$

$$\frac{\partial A_z}{\partial \rho} = \frac{\mu}{4\pi} \int_z J \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{e^{-jk r}}{r} dz$$

$$= \int_z J \left( -jk \frac{\rho}{r^2} e^{-jk r} - \frac{\rho}{r^3} e^{-jk r} \right) dz$$

【0104】従って、リアクションBは、以下のように表すことができる。

【0105】

【数14】

33

34

$$B = \frac{h}{4\pi} \int_t \int_z J M \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{e^{-jkr}}{r} \sin \phi \, dz \, dt$$

$$= \frac{h \sin \phi}{4\pi} \int_t \int_z J M \left[ -\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jkr} \, dz \, dt$$

【0106】更に、ダイポール $z_1$ 、 $t_1$ 間の中心の距離は \* 下のように表すことができる。  
同様に、 $r_0 = (z_1^2 + t_1^2 - 2z_1 t_1 \cos \phi + h^2)^{1/2} \approx$  【0107】  
 $r_0 + d$  と表すことができるので、リアクションBは、以 \* 10 【数15】

$$B \approx \frac{h \sin \phi}{4\pi} e^{-jkr_0} \int_t \int_z M J \left[ -\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jkd} \, dz \, dt$$

【0108】従って、モノポール①とモノポール③との ※とができる。  
間のリアクションB13、及び、モノポール①とモノポー 20 【0109】  
ル④との間のリアクションB14は、以下のように表すこ※ 【数16】

$$B_{13} = \frac{h_1 \sin \phi_1}{4\pi \sin kd_1 \sin kd_3} e^{-jkr_0} \int_t \int_z \sin k(z-z_0) \sin k(t-t_0) \left[ -\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jkd} \, dz \, dt$$

$$B_{14} = \frac{h_2 \sin \phi_2}{4\pi \sin kd_1 \sin kd_4} e^{-jkr_0} \int_t \int_z \sin k(z-z_0) \sin k(t_2-t) \left[ -\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jkd} \, dz \, dt$$

【0110】ここで、式を簡潔な形にするために、 $z - z_0 = u$ 、 $t - t_0 = v$ 、 $w = -t + t_2$ とおく。また、モノポールが短いものとして、以下のような多項式近似を行う。即ち、 $\sin ku \approx ku - (ku)^3/6$ 及び $\cos ku \approx 1 - (ku)^2/2$ である。

【0111】以上により、相互リアクションB13の右辺

第2項は以下のように表される。なお、(数17)に示す式と(数18)に示す式とは併せて連続して展開される式を示す。

【0112】

【数17】

35

36

$$\begin{aligned}
& \int_t \int_z \sin ku \sin kv \left[ -\frac{1}{r^3} \right] e^{-ikd} dz dt \\
&= - \int_t \int_z \left[ ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[ kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \\
&\quad [\cos kd - j \sin kd] \frac{1}{r^3} dz dt \\
&= - \int_t \int_z \left\{ \left[ ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[ kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \left[ 1 - \frac{(kd)^2}{2} \right] \right. \\
&\quad \left. - j \left[ ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[ kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \right. \\
&\quad \left. \left[ kd - \frac{(kd)^3}{6} \right] \right\} \frac{1}{r^3} dz dt
\end{aligned}$$

【0113】

【数18】

$$\begin{aligned}
&= - \int_t \int_z \left[ uvk^2 - \frac{u^3v + uv^3 + 3uvd^2}{6} k^4 \right. \\
&\quad \left. + \frac{u^3v^3 + 3u^3vd^2 + 3uv^3d^2}{36} k^6 - \frac{u^3v^3d^2}{72} k^8 \right. \\
&\quad \left. - j \left[ uvd k^3 - \frac{u^3vd + uv^3d + uvd^3}{6} k^5 \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{u^3v^3d + u^3vd^3 + uv^3d^3}{36} k^7 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^9 \right] \right] \frac{1}{r^3} dz dt
\end{aligned}$$

【0114】ここで、式を簡潔な形にするために、 $k^2$ 等の項の係数をP1～P8に書き換えると、上式は以下のうに表される。

$$P1k^2 + P2k^4 + P3k^6 + P4k^8 + j(P5k^3 + P6k^5 + P7k^7 + P8k^9)$$

次に、相互リアクションB13の右辺第1項も、同様に以

下のように表される。なお、(数19)に示す式と(数20)に示す式とは併せて連続して展開される式を示す。

【0115】

【数19】

$$\begin{aligned}
& \int_t \int_z \sin ku \sin kv \left[ -\frac{jk}{r^2} \right] e^{-jkd} dz dt \\
& = - \int_t \int_z \left[ uvk^2 - \frac{u^3v + uv^3 + 3uvd^2}{6} k^4 \right. \\
& \quad + \frac{u^3v^3 + 3u^3vd^2 + 3uv^3d^2}{36} k^6 - \frac{u^3v^3d^2}{72} k^8 \\
& \quad - j \left[ uvdk^3 - \frac{u^3vd + uv^3d + uvd^3}{6} k^5 \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{u^3v^3d + u^3vd^3 + uv^3d^3}{36} k^7 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^9 \right] \right] \frac{jk}{r^2} dz dt
\end{aligned}$$

【0116】

【数20】

$$\begin{aligned}
& = - \int_t \int_z \left[ uvdk^4 - \frac{u^3vd + uv^3d + uvd^3}{6} k^6 \right. \\
& \quad + \frac{u^3v^3d + u^3vd^3 + uv^3d^3}{36} k^8 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^{10} \\
& \quad + j \left[ uvk^3 - \frac{u^3v + uv^3 + 3uvd^2}{6} k^5 \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{u^3v^3 + 3u^3vd^2 + 3uv^3d^2}{36} k^7 - \frac{u^3v^3d^2}{72} k^9 \right] \right] \frac{1}{r^2} dz dt
\end{aligned}$$

【0117】ここで、式を簡潔な形にするために、 $k^2$  等の項の係数をQ1～Q8に書き換えると、上式は以下のよう

$$Q1k^4 + Q2k^6 + Q3k^8 + Q4k^{10} + j(Q5k^3 + Q6k^5 + Q7k^7 + Q8k^9)$$

ゆえに、相互リアクションB13は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
B13 &= (h1 \sin \phi 1 / 4 \pi d1 d3) e^{-jkr0} \times \\
& \quad [ P1 + (P2 + Q1)k^2 + (P3 + Q2)k^4 + (P4 + Q3)k^6 + Q4k^8 \\
& \quad + j[ (P5 + Q5)k + (P6 + Q6)k^3 + (P7 + Q7)k^5 + (P8 + Q8)k^7 ] ] \\
& = e^{-jkr0} [ R1 + R2k^2 + R3k^4 + R4k^6 + R5k^8 ]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B13 &= (h1 \sin \phi 1 / 4 \pi \sin kd1 \sin kd3) e^{-jkr0} \times [ P1k^2 + P2k^4 + P3k^6 + P4k^8 + j( P5k^3 + P6k^5 + P7k^7 + P8k^9 ) \\
& \quad + Q1k^4 + Q2k^6 + Q3k^8 + Q4k^{10} + j( Q5k^3 + Q6k^5 + Q7k^7 + Q8k^9 ) ]
\end{aligned}$$

ここで、上式に近似値 $\sin kd1 \sin kd3 \approx d1 d3 k^2$ を代入すると、相互リアクションB13は以下のように表される。

相互リアクションB14についても同様にして求めることができる。即ち、相互リアクションB14は以下のように表される。

$$B14 = e^{-jkr^0} [S1 + S2k^2 + S3k^4 + S4k^6 + S5k^8 + j(S6k + S7k^3 + S8k^5 + S9k^7)]$$

ゆえに、相互リアクション (B13+B14) は、以下のよう表される。

$$【0118】 B13+B14 = e^{-jkr^0} [C1 + C2k^2 + C3k^4 + C4k^6 + C5k^8 + j(C6k + C7k^3 + C8k^5 + C9k^7)]$$

相互リアクション (B23+B24) についても同様にして求めることができる。B23はモノポール②とモノポール③の相互リアクションであり、B24はモノポール②とモノポール④の相互リアクションである。

【0119】従って、相互インピーダンス (B13+B14+B23+B24) も、上式と同様に、波数kの多項式により表すことができる。

(モーメント法の連立方程式の拡大) 前述のように、例えば相互インピーダンスZijについてのモーメント法の連立方程式の代表的なものは [Zij] [Ii] = [Vi] である。この連立方程式に求めた相互インピーダンスZijが代入され、各要素を流れる電流の値Iiが求められる。

【0120】しかし、電磁流計算処理部10において用いられるモーメント法の連立方程式は上述のものに限られない。換言すれば、前述の近似式を用いて求めた相互インピーダンス等の近似値は、種々の形のモーメント法の連立方程式に適用できる。即ち、そのまま代入できる。電磁流計算処理部10は、以下に述べるように電気回路装置を分割した各要素の種類に応じて、種々のモーメント法の連立方程式を用いて電流の値Ii等を求める。

【0121】解析対象となる電気回路装置の構造情報に基づいて、入力処理部1は、電気回路装置の構造体をメッシュに分割する。例えば、金属のワイヤ部分については線分割することにより、ワイヤのダイポールを生成する。金属や誘電体の面部分については面分割することにより、サーフェスパッチのダイポールを生成する。また、必要に応じてその他の形状のダイポールを生成する。

【0122】続いて、分割した金属同士の相互インピーダンスZ<sup>0 c, c</sup>、分割した金属と誘電体との相互インピーダンスZ<sup>0 c, d</sup> / Z<sup>0 d, c</sup>、分割した誘電体同士の相互インピーダンスZ<sup>0 d, d</sup> / Z<sup>d d, d</sup>、分割した誘電体同士の相互アドミッタンスY<sup>0 d, d</sup> / Y<sup>d d, d</sup>、分割した金属と誘電体との相互リアクションB<sup>0 c, d</sup> / B<sup>d c, c</sup>、及び、分割した誘電体同士の相互リアクションB<sup>0 d, d</sup> / B<sup>d d, d</sup>とが算出される。従って、実際の電気回路装置の解析においては、相互インピーダンス、相互

$$+ j(R6k + R7k^3 + R8k^5 + R9k^7)]$$

アドミッタンス及び相互リアクションが全て求められる。

【0123】ここで、肩付き文字“0”は空気中での計算値を表し、肩付き文字“d”は誘電体中での計算値を表し、添え字“c”は金属を表し、添え字“d”は誘電体を表し、添え字“c, c”は、金属から金属への相互関係を表し、添え字“d, d”は、誘電体から誘電体への相互関係を表し、添え字“c, d”は、誘電体から金属への相互関係を表し、添え字“d, c”は、金属から誘電体への相互関係を表している。

【0124】サンプリング周波数における相互インピーダンス等は、サンプル計算処理部4において、周知の計算処理によって算出される。周波数範囲内の所定の周波数 (例えば高調波成分) における相互インピーダンス等は、近似計算処理部9において、本発明により近似式を用いた計算処理によって算出される。

【0125】続いて、入力処理部1又は電磁流計算処理部10において、モーメント法の連立方程式が設定される。どのような式を設定するかは、2個の要素であるダイポールの種類により、予め定められる。

【0126】プリント板に存在する波源Viと、分割した金属に流れる電流の大きさを表す係数I<sub>c, n</sub>と、分割した誘電体の表面に流れる等価電流の大きさを表す係数I<sub>d, n</sub>と、分割した誘電体の表面に流れる等価磁流の大きさを表す係数M<sub>n</sub>とを用いて、以下のモーメント法の連立方程式が設定される。なお、「[ ]」はマトリクスを表す。

【0127】金属の表面電界値がゼロを示すという境界条件からは次のモーメント法の連立方程式が設定される。

$$[Z^{0 c, c}] [I_{c, n}] + [Z^{0 c, d}] [I_{d, n}] + [B^{0 c, d}] [M_n] = [V_i]$$

誘電体の境界面の両側で電界の接線成分が等しいという境界条件からは次のモーメント法の連立方程式が設定される。

$$【0128】 [Z^{0 d, c}] [I_{c, n}] + [Z^{0 d, d} + Z^{d d, d}] [I_{d, n}] + [B^{0 d, d} + B^{d d, d}] [M_n] = [0]$$

誘電体の境界面の両側で磁界の接線成分が等しいという境界条件からは次のモーメント法の連立方程式が設定される。

$$【0129】 [B^{0 d, c}] [I_{c, n}] + [B^{0 d, d} + B^{d d, d}] [I_{d, n}] + [-Y^{0 d, d} - Y^{d d, d}] [M_n] = [0]$$

以上をまとめると、図6 (A) に示すモーメント法の連立方程式が設定される。なお、このモーメント法の連立方程式の設定にあたって、ケーブルにコモンモード電流の低減化を実現するコアが挿入されるときには、そのケーブルの持つ相互インピーダンスZ<sup>0 c, c</sup>をそのコアの

インピーダンス $Z$ に減じる必要がある。従って、この場合、モーメント法の連立方程式は図6(B)に示すように変形される。

【0130】また、反射波を生成する大地面があるときには、反射波を生成する構造体イメージを生成するとともに、その構造体イメージに対して実像とは同じ大きさを持つ逆向きの電磁流を想定する。そして、図7(A)に示すような実像間のモーメント法のマトリクスを算出するとともに、図7(B)に示すような実像とイメージとの間のモーメント法のマトリクスを算出して、この2つのマトリクスを使って、図7(C)に示すモーメント法の連立方程式を設定する。

【0131】イメージが理論的には実像に対して負の極性を持つことを利用して、イメージ電流を実像電流に対して負の極性を持つもので表すという反射波処理を行うことによって、未知数の増加を避けることができるので、計算時間は概略2倍程度で済む。これに対して、イメージ電流を未知数として扱う場合、未知数が2倍となるので、計算時間も概略4倍となる。従って、この反射波処理を行うことにより、近似計算と併せて更に高速処理が実現できる。

【0132】電磁流計算処理部10は、以上のように設定したモーメント法の連立方程式に、近似計算によって求めた相互インピーダンス等を代入して、この連立方程式を解く。即ち、プリント板の持つ金属に流れる電流、プリント板の持つ誘電体の表面に流れる等価電流/等価電流、ケーブルやワイヤやリードに流れる電流(コモンモード電流も含む)、金属筐体や金属構造物に流れるコモンモード電流等を算出する。

(近似係数算出処理の拡大) 前述のように、近似係数計算部2における処理は、サンプル計算処理部4において相互インピーダンス等を近似式を用いない周知の方法によって算出し、これを用いて近似係数算出処理部5において連立方程式を解くことによって近似係数を求める処理であった。しかし、近似係数計算部2において近似係数を求める処理は上述の処理に限定されない。

【0133】例えば、近似係数はこれを直接計算して算出して良い。前述の相互インピーダンスの近似式の導出についての証明において示したように、近似係数は距離の関数である。簡単に説明すると、近似係数の導出の直前の段階における係数C0等は、その直前の段階における係数P1等、Q1等、R1等及びS1等で表される。これらの係数P1等は、 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 及び $d$ 等で表される。これらの $u$ 等の値は、モノポール間の距離 $r$ を規定するものであるから、距離を与えるものであり、また、モノポール間の距離 $r$ が前述のように規定できるものである以上、その値も求めることができる。従って、近似係数を直接計算によって求めることができる。

【0134】これは、相互アドミッタンス及び相互リアクションについても同様である。従って、近似係数計算

部2において、相互インピーダンス、相互アドミッタンス及び相互リアクションについて、当該相互インピーダンス等を表す近似式における複数の近似係数を、直接計算によって算出するようにしても良い。

【0135】

【実施例】本発明の有効性を検証するため、本発明による電磁界強度算出装置20によって求めた相互インピーダンスの値と、モーメント法による計算を実行する電磁界強度算出装置によって求めた相互インピーダンスの値とを、互いに比較して誤差を調べる。

【0136】図8は誤差の比較のために用いた周波数を示す。なお、図8において、各周波数に対応する波数 $k$ の値を示した。サンプリング周波数は5個とした。従って、 $n=5$ である。即ち、相互インピーダンス $Z_{ij}$ についての近似式は、 $Z_{ij} = \exp(-jkr) [a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + j(b_0/f + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7)]$ を用いた。5個のサンプリング周波数 $f_{s1}$ 、 $f_{s2}$ 、 $f_{s3}$ 、 $f_{s4}$ 及び $f_{s5}$ は、各々、30MHz(3e+007 即ち、 $3 \times 10^7$ )、250MHz、500MHz、750MHz及び1GHzとした。これは、周波数範囲が30MHz~1GHzである場合に相当する。5個のサンプリング周波数における相互インピーダンス $Z_{ij}$ は、サンプル計算処理部4において、モーメント法において用いられる周知の計算処理によって求められる。

【0137】近似式を用いた計算により相互インピーダンス $Z_{ij}$ を求める周波数 $f$ は、100MHz(1e+008 即ち、 $1 \times 10^8$ )とした。この周波数における相互インピーダンス $Z_{ij}$ は、比較のために、モーメント法において用いられる周知の計算処理と本発明による近似式を用いた計算処理との双方によって求められる。

【0138】また、この比較試験におけるモノポールの構造は図9に示す構造を想定した。この構造は図4に示す構造と同一である。この比較試験では、モノポール①及び②は変化せず図中左端のモノポールとされる。一方、モノポール③及び④は図中#1乃至#6の何れかが選択される。これにより、モノポール間の距離 $r$ が変更される。図9においては各モノポール間の距離を等しく表したが、モノポール①及び②とモノポール#1との距離は0.0001m(メートル)、モノポール#2との距離は0.001m、モノポール#3との距離は0.01m、モノポール#4との距離は0.1m、モノポール#5との距離は1m、モノポール#6との距離は10mとした。モノポールであるワイヤの直径は2 $\mu$ mとした。また、モノポールの各々の長さは0.03mとした。

【0139】図10はダイポール間の距離 $r=0$ mである場合の相互インピーダンス $Z_{ij}$ の計算値を示す。なお、距離 $r=0$ mであるから、正確には、図10はモノポール①及び②についての自己インピーダンスを近似式を用いた計算により算出した値等を示す。本明細書にお



いては、相互インピーダンスは自己インピーダンスをも含む概念である。

【0140】図10の近似係数の欄において、 $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 及び $c_4$ は、各々、前述の近似式の実数部における近似係数 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 及び $a_4$ の計算値を示す。 $m_0$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 及び $m_4$ は、各々、前述の近似式の虚数部における近似係数 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 及び $b_4$ の計算値を示す。なお、図10における $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 及び $c_4$ は、先に示した相互リアクションの近似式において用いられている近似係数とは異なるものであり区別される。近似係数 $c_0 \sim c_4$ 及び $m_0 \sim m_4$ は、前述の5個のサンプリング周波数等を用いて、近似係数算出処理部5において求められる。

【0141】図10において、各近似係数に波数 $k$ の巾乗を掛けた値を示した。例えば、 $c_1 * k^2$ は近似係数 $c_1$ に波数 $k$ の2乗を掛けた値を示す。波数 $k$ の値は、式 $k = 2\pi f / c$ に解析の対称である周波数 $f = 100 \text{ MHz}$ を代入することにより求めた。近似係数に波数 $k$ の巾乗を掛けた値は、近似係数に周波数 $f$ の巾乗を掛けた値と同様の意味を持つ。図11乃至図16においても同様である。

【0142】指数部の欄に近似式における $e^{-ikr}$ の値を示す。指数部の欄において、括弧内のカンマで区別した前半に実数部の値を示し、後半に実数部の値を示す。近似値の欄に本発明の近似式によって算出した相互インピーダンスの値を示す。近似値の欄において、括弧内のカンマで区別した前半に実数部の値を示し、後半に実数部の値を示す。以上の値は近似計算処理部9において求められる。図11乃至図16においても同様である。

【0143】モーメント法の欄に従来のモーメント法によって算出した相互インピーダンスの値を示す。モーメント法の欄において、括弧内のカンマで区別した前半に実数部の値を示し、後半に実数部の値を示す。これらの値は従来の電磁界強度算出装置において求めたものである。図11乃至図16においても同様である。

【0144】誤差の欄に従来のモーメント法によって算出した相互インピーダンスの値と本発明の近似式によって算出した相互インピーダンスの値との間の誤差を示す。誤差の欄において、点線で区別した前半に実数部の誤差を示し、後半に実数部の誤差を示す。

【0145】モーメント法の欄に示す値と近似値の欄に示す値との比較から判るように、両者の値は極めて近似している。そして、誤差の欄に示すように、有効数字の小数点以下5桁までの誤差を求めると、その値は0%となる。従って、極めて優れた近似であることが判る。

【0146】図11はダイポール間の距離 $r = 0.0001 \text{ m}$ である場合、図12はダイポール間の距離 $r = 0.001 \text{ m}$ である場合、図13はダイポール間の距離 $r = 0.01 \text{ m}$ である場合について示す。図示のように、これらの場合も、有効数字の小数点以下5桁までの誤差は0%である。周波数 $100 \text{ MHz}$ である場合、距離 $0.01 \text{ m}$ 以下において

は誤差がないと考えて良い。

【0147】図14はダイポール間の距離 $r = 0.1 \text{ m}$ である場合、図15はダイポール間の距離 $r = 1 \text{ m}$ である場合、図16はダイポール間の距離 $r = 10 \text{ m}$ である場合について示す。図14乃至図16に示す場合においては、図示のような誤差が発生している。周波数 $100 \text{ MHz}$ である場合、誤差のピークは $r = 0.1 \text{ m}$ にある。誤差は、図から判るように、ダイポール間の距離 $r$ が大きくなるにつれて拡大することなく収束する。従って、この点からも極めて優れた近似であることが判る。

【0148】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、解析対象となる電気回路装置の放射する電磁界強度を算出する電磁界強度算出装置において、周波数の多項式と言う極めて簡潔な形で表される近似式によって各周波数毎に相互インピーダンス等を求めることにより、その演算処理を極めて短時間で行うことができるので、電界及び磁界の算出に要する時間の大部分を占めていた相互インピーダンス等の算出を極めて短時間で行うことができ、電磁界強度の算出を極めて短時間で行うことができる。この結果、規制周波数帯域内にある多くの高調波成分について解析する場合でも電磁界強度の算出を極めて短時間で行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の原理構成図である。

【図2】電磁界強度算出装置構成図である。

【図3】電磁界強度算出処理フローである。

【図4】近似式の前提の説明図である。

【図5】近似式の前提の説明図である。

【図6】モーメント法の連立方程式の説明図である。

【図7】反射波処理の説明図である。

【図8】実施例の前提説明図である。

【図9】実施例の前提説明図である。

【図10】近似結果説明図である。

【図11】近似結果説明図である。

【図12】近似結果説明図である。

【図13】近似結果説明図である。

【図14】近似結果説明図である。

【図15】近似結果説明図である。

【図16】近似結果説明図である。

【図17】従来技術説明図である。

【図18】本発明の背景説明図である。

【図19】本発明の背景説明図である。

【符号の説明】

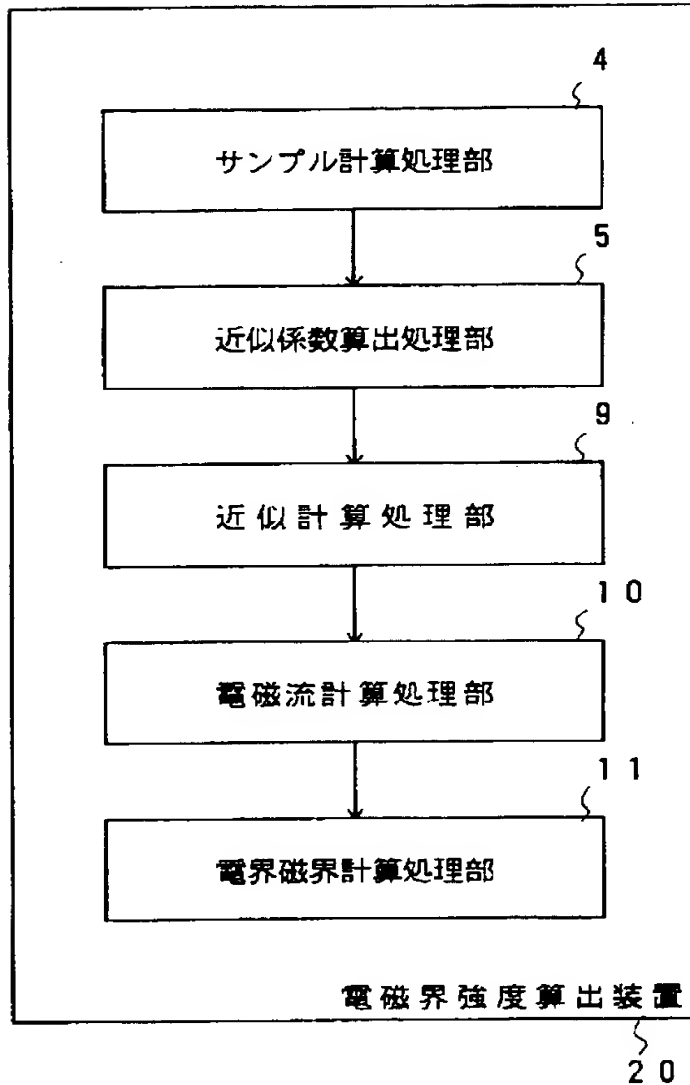
- |   |           |
|---|-----------|
| 1 | 入力処理部     |
| 2 | 近似係数計算部   |
| 3 | サンプル指定処理部 |
| 4 | サンプル計算処理部 |
| 5 | 近似係数算出処理部 |
| 6 | データファイル   |

- 45
- 7 インピーダンスファイル
- 8 係数ファイル
- 9 近似計算処理部

- 46
- 10 電磁流計算処理部
- 11 電界磁界計算処理部
- 12 出力ファイル

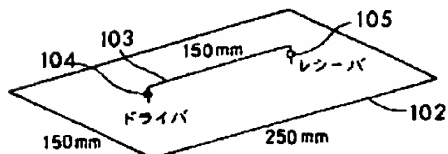
【図1】

## 本発明の原理構成図



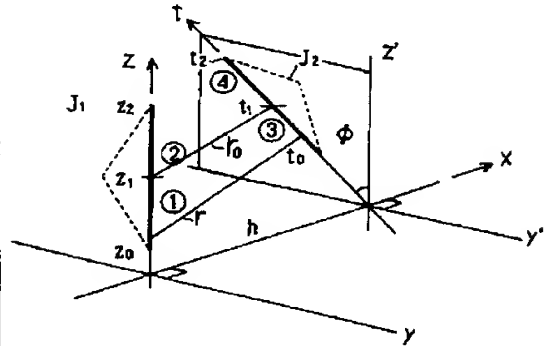
【図18】

## 本発明の背景説明図



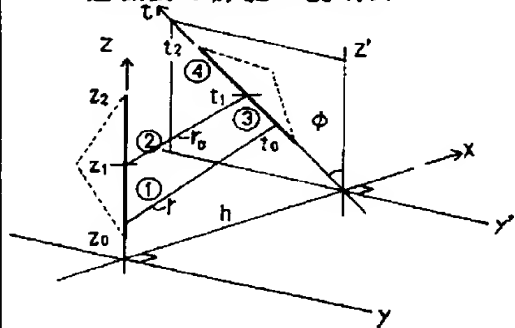
【図4】

## 近似式の前提の説明図



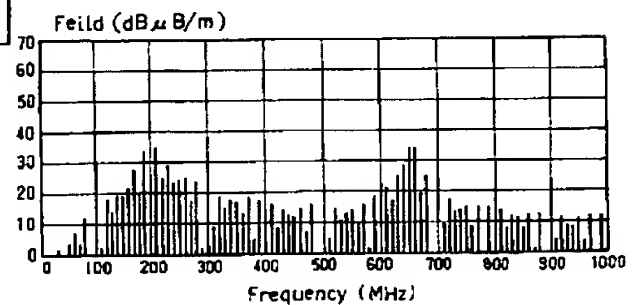
【図5】

## 近似式の前提の説明図



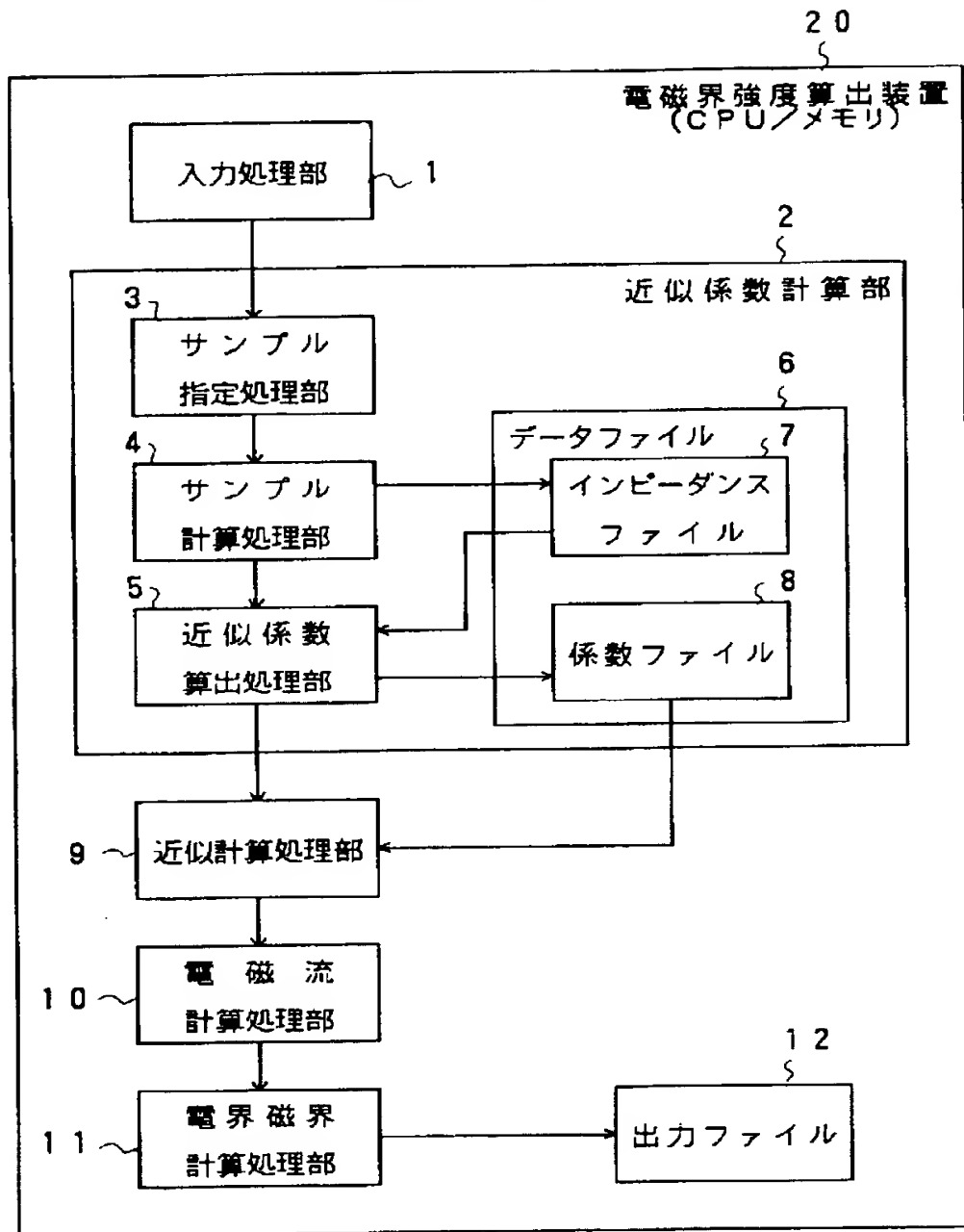
【図19】

## 本発明の背景説明図



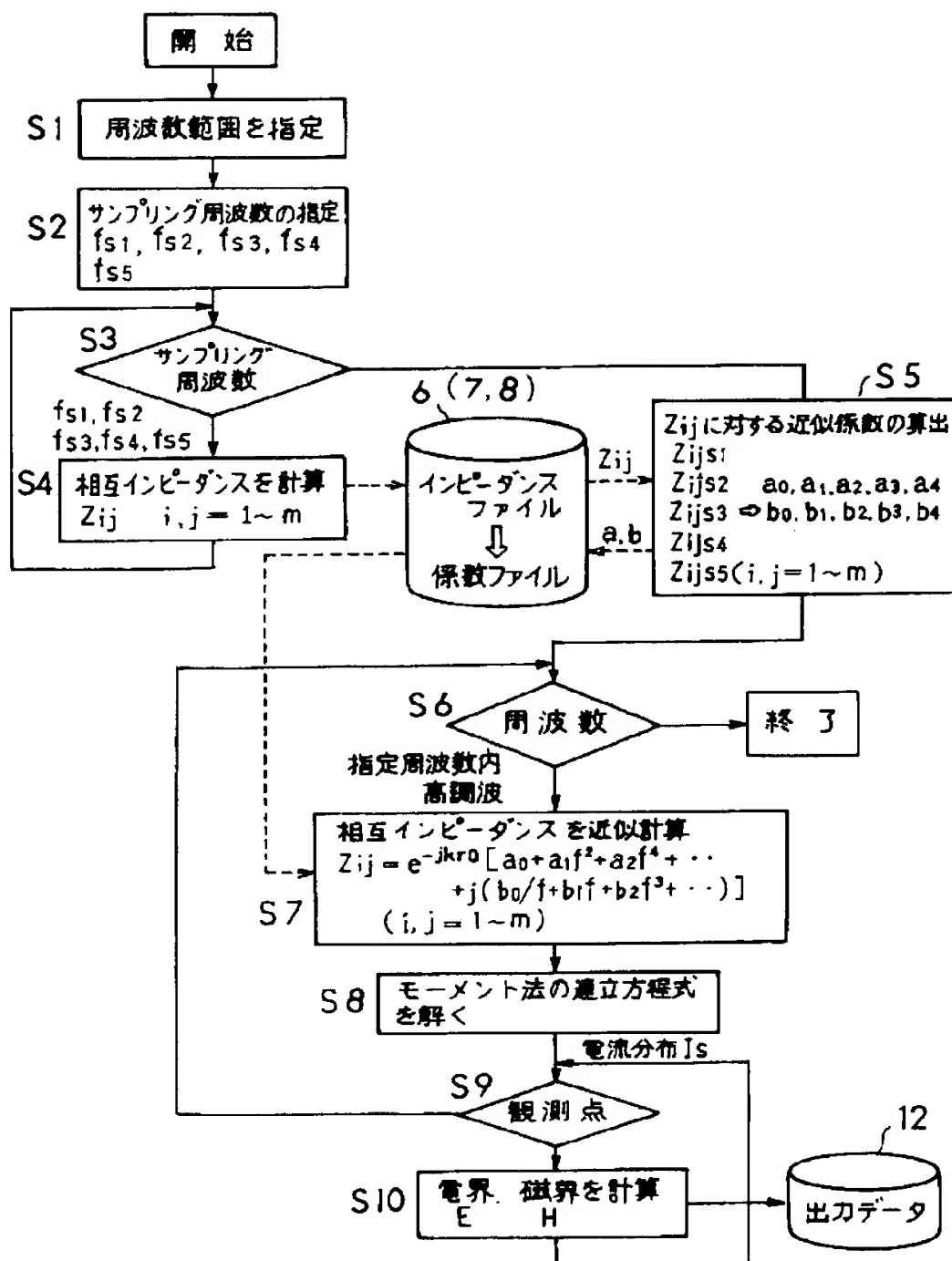
【図2】

## 電磁界強度算出装置構成図



【図 3】

## 電磁界強度算出処理フロー



【図6】

モーメント法の連立方程式の説明図

$$\begin{bmatrix} Z^0 c, c & Z^0 c, d & B^0 c, d \\ Z^0 d, c & Z^0 d, d + Z^0 d, d & B^0 d, d + B^0 d, d \\ B^0 d, c & B^0 d, d + B^0 d, d - Y^0 d, d - Y^0 d, d \\ \hline \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c, n} \\ I_{d, n} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A)$$

$$\begin{bmatrix} Z^0 c, c - ZL & Z^0 c, d & B^0 c, d \\ Z^0 d, c & Z^0 d, d + Z^0 d, d & B^0 d, d + B^0 d, d \\ B^0 d, c & B^0 d, d + B^0 d, d - Y^0 d, d - Y^0 d, d \\ \hline \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c, n} \\ I_{d, n} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(B)

$$[M] = \begin{bmatrix} Z^0 c, c & Z^0 c, d & B^0 c, d \\ Z^0 d, c & Z^0 d, d + Z^0 d, d & B^0 d, d + B^0 d, d \\ B^0 d, c & B^0 d, d + B^0 d, d - Y^0 d, d - Y^0 d, d \end{bmatrix}$$

(A)

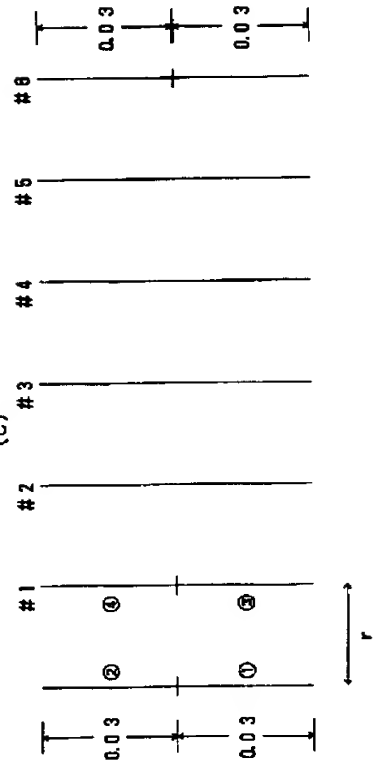
反射波処理の説明図

$$[M'] = \begin{bmatrix} Z^0 c, c' & Z^0 c, d' & B^0 c, d' \\ Z^0 d, c' & Z^0 d, d' + Z^0 d, d' & B^0 d, d' + B^0 d, d' \\ B^0 d, c' & B^0 d, d' + B^0 d, d' - Y^0 d, d' - Y^0 d, d' \end{bmatrix}$$

(B)

$$[ [M] - [M'] ] \begin{bmatrix} I_{c, n} \\ I_{d, n} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(C)



【図9】

実施例の前提説明図

【図8】

実施例の前提説明図

	周波数 $f$ Hz	波数 $k = \frac{2\pi f}{c}$
サンプル周波数	$f = 3e+007$	$k = 0.628753$
	$f = 2.5e+008$	$k = 5.23961$
	$f = 5e+008$	$k = 10.4792$
	$f = 7.5e+008$	$k = 15.7188$
	$f = 1e+009$	$k = 20.9584$
近似する周波数	$f = 1e+008$	$k = 2.09584$

【図 10】

近似結果説明図

$r = 0n$	
実数部	$c0 = 4.412040308583589e-010$ $c1 = 1.798754920324100e-002$ $c2 = 2.158563976947456e-008$ $c3 = 2.536386022241146e-010$ $c4 = 3.1413918868255842e-014$
虚数部	$m0 = -3.0777588459623e+004$ $m1 = 9.633050183204359e+000$ $m2 = 6.527899901706556e-004$ $m3 = 6.025880521383044e-008$ $m4 = 6.302697310212078e-012$
指数部	$e[krm] = (1, 0)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	(7.905315245501043e-002, -1.466493708629832e+004)
近似値 (実数部, 虚数部)	(7.90531489555282e-002, -1.466493708659571e+004)
誤差 (実数部, 虚数部)	(-0.00000 %, 0.00000 %)

【図 12】

近似結果説明図

$r = 0.001n$	
実数部	$c0 = 9.798065266375381e+000$ $c1 = 1.4647659587257311e-002$ $c2 = 1.888116113915761e-006$ $c3 = 2.260768811017546e-010$ $c4 = 2.823967565195653e-014$
虚数部	$m0 = -9.798065266375381e+003$ $m1 = 3.343118683158932e+000$ $m2 = 2.76731282543251e-004$ $m3 = 2.814451791042031e-008$ $m4 = 3.182964157287183e-012$
指数部	$e[krm] = (0.99999, -0.00209584)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	(7.905308300498604e-002, -4.667042311680252e+003)
近似値 (実数部, 虚数部)	(7.905307949749450e-002, -4.66704231183987e+003)
誤差 (実数部, 虚数部)	(-0.00000 %, 0.00000 %)

【図 11】

近似結果説明図

$r = 0.001n$	
実数部	$c0 = 1.882208319840959e+000$ $c1 = 1.738291158321004e-002$ $c2 = 2.114863219239820e-006$ $c3 = 2.435161976379382e-010$ $c4 = 3.056308709201438e-014$
虚数部	$m0 = -1.882208319840959e+004$ $m1 = 6.046438940327548e+000$ $m2 = 4.374675826465934e-004$ $m3 = 4.188420243198447e-008$ $m4 = 4.515950396303039e-012$
指数部	$e[krm] = (1, -0.00209584)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	(7.905315176225969e-002, -8.967950765659779e+003)
近似値 (実数部, 虚数部)	(7.905314828263812e-002, -8.967950765888676e+003)
誤差 (実数部, 虚数部)	(-0.00000 %, 0.00000 %)

【図 13】

近似結果説明図

$r = 0.01n$	
実数部	$c0 = 2.201363234833243e+001$ $c1 = 7.25721523298106e-003$ $c2 = 1.02203409233791e-008$ $c3 = 1.250315908882877e-010$ $c4 = 1.57701021180322e-014$
虚数部	$m0 = -2.201363234833243e+003$ $m1 = 1.146406158386832e+000$ $m2 = 1.32378933606546e-004$ $m3 = 1.534665181650728e-008$ $m4 = 1.895808365106552e-012$
指数部	$e[krm] = (0.99978, -0.0209589)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	(7.904620713581184e-002, -1.048174457088937e+003)
近似値 (実数部, 虚数部)	(7.904620355063421e-002, -1.048174457189659e+003)
誤差 (実数部, 虚数部)	(-0.00000 %, 0.00000 %)

【図 14】

近似結果説明図

$r = 0.1n$	
実数部	$c0 = 2.062951327198163e+001$ $c1 = -2.871992103189478e-003$ $c2 = -3.979080114630688e-006$ $c3 = -2.176504092898787e-009$ $c4 = -7.868187804287443e-012$
虚数部	$m0/k = -2.062950433958841e+002$ $m1/k = 8.36015409535249e-001$ $m2/k = 5.051112536215732e-004$ $m3/k = 2.428907209783183e-007$ $m4/k = 8.388188498657908e-010$
指数部	$e/krm = (0.978117, -0.208053)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	$(7.860979546808822e-002, -9.872425093070460e+001)$
近似値 (実数部, 虚数部)	$(7.853910549588258e-002, -9.872461865453820e+001)$
誤差 (実数部, 虚数部)	$(-0.08983 \%, 0.00037 \%)$

【図 16】

近似結果説明図

$r = 10n$	
実数部	$c0 = 2.688163189903768e-004$ $c1 = 4.81457253381429e-008$ $c2 = 5.179300456778175e-010$ $c3 = -2.1826806096804028e-012$ $c4 = 2.743225505192658e-015$
虚数部	$m0/k = -2.688163189903768e-005$ $m1/k = 2.688125240952908e-003$ $m2/k = 4.045245291426151e-007$ $m3/k = 5.232881036380441e-011$ $m4/k = 5.536866749333253e-015$
指数部	$e/krm = (-0.512501, -0.858887)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	$(4.709468671392880e-003, -3.125338245835654e-003)$
近似値 (実数部, 虚数部)	$(4.709495923782538e-003, -3.125305180588007e-003)$
誤差 (実数部, 虚数部)	$(0.00058 \%, -0.00099 \%)$

【図 15】

近似結果説明図

$r = 1n$	
実数部	$c0 = 2.686358731101072e-002$ $c1 = 4.93336128785999e-006$ $c2 = 4.686034411158291e-008$ $c3 = -1.924592410843346e-010$ $c4 = 2.400123825585841e-013$
虚数部	$m0/k = -2.686358731101072e-002$ $m1/k = 2.697411324175343e-002$ $m2/k = 3.845803592028491e-006$ $m3/k = 1.382733175726581e-009$ $m4/k = -9.978524212922421e-013$
指数部	$e/krm = (-0.501255, -0.8853)$
モーメント法 (実数部, 虚数部)	$(2.428090537351224e-002, -4.525681716860142e-002)$
近似値 (実数部, 虚数部)	$(2.428931868925049e-002, -4.525745320153434e-002)$
誤差 (実数部, 虚数部)	$(0.03465 \%, 0.00141 \%)$

【図17】

## 従来技術説明図

